

Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов
машиностроительных специальностей высших учебных заведений.*

Минск
УП «Технопринт»
2000

УДК 621.81(075.8)

ББК 34.41я73

М 88

Рецензенты: **М. Ф. Пашкевич**, зав. кафедрой технологии машиностроения Могилевского машиностроительного института, д. т. н., профессор;
П. А. Витязь, академик НАНБ, д. т. н.

Мрочек Ж. А. и др.

М88 Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин:– Учеб. пособие / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов.– Мн.: УП «Технопринт», 2000.– 268 с.
ISBN 985-6373-74-3

Приведены обобщенные сведения о способах и оборудовании для наплавки покрытий, обеспечивающих повышение износо- и коррозионной стойкости рабочих поверхностей деталей машин и механизмов. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитной наплавки и наплавки с поверхностным пластическим деформированием. Представлены сведения о кинематике и динамике деформирующего элемента, температурах и тепловых процессах, остаточных напряжениях в системе покрытие–основа. Описаны результаты рентгеноструктурного и электронномикроскопических исследований покрытий. Обоснованы оптимальные режимы восстановления и упрочнения изделий.

Учебник предназначен для студентов ремонтных и машиностроительных специальностей высших учебных заведений, аспирантов и инженерно-технических работников, специализирующихся в области формирования защитных и упрочняющих покрытий.

УДК 621.81(075.8)

ББК 34.41я73

ISBN 985-6373-74-3

© Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро,
И. П. Филонов, 2000.

© УП «Технопринт», 2000.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач научно-технического прогресса является внедрение в промышленность технологических процессов, обеспечивающих повышение производительности труда и увеличение коэффициента использования материалов, уменьшение энергоемкости и себестоимости изделий.

В настоящее время для повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей, позволяющих увеличить скорость и нагрузки современных машин и технологического оборудования, широкое распространение получили методы газопламенного и плазменного напыления, электромагнитной наплавки и лазерного упрочнения. В практике имеются технические решения, объединяющие вышеуказанные процессы с традиционными методами лезвийной обработки и поверхностного пластического деформирования.

Для изучения и использования методов повышения износостойкости деталей, а также объединения различных процессов необходимо знать и понимать разнообразные явления, происходящие в поверхности обрабатываемой заготовки. Навыки управления такими процессами могут быть приобретены только в ходе детального изучения тепловых процессов, особенностей контактного взаимодействия, свойств порошков и т. п.

В предлагаемом учебном пособии рассматриваются вопросы кинетики формирования покрытий при электромагнитной наплавке, порошковые материалы, методики, позволяющие оценить стабильность процесса, надежность и долговечность деталей в производственных условиях. Изложены теоретические основы контактного взаимодействия поверхностей при комбинированном методе наплавки с поверхностным пластическим деформированием, показано влияние характера движения деформирующего элемента на качество обрабатываемой поверхности. Раскрыты свойства порошковых материалов и покрытий на их основе, приведены результаты исследований микроструктуры, фазового состава покрытий, особенностей структурообразования при электромагнитной наплавке с поверхностным пластическим деформированием, результаты рентгеноструктурных исследований. Особое внимание уделено оптимизации технологии на основе математического моделирования.

Учебное пособие позволяет изучить и освоить новейшие энерго- ресурсосберегающие технологии и наметить пути повышения производительности процессов обработки и улучшения качества износостойких покрытий за счет совмещения операций предварительной обработки поверхности, наплавки и окончательного формообразования.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Быстрое разрушение изделий, работающих при высоких скоростях, нагрузках и температурах, а также в условиях абразивного, коррозионного и других видов воздействия, требует разработки и внедрения в производство новых методов их упрочнения и восстановления.

Основными причинами потери работоспособности изделий являются абразивное и другие виды изнашивания, усталостные поломки и выкрашивание материала, различного рода коррозионные и кавитационные разрушения, жидкостная и газовая эрозии и всевозможные сочетания отмеченных выше причин.

Увеличить износостойкость рабочих поверхностей изделий можно изменением химического состава материала поверхности путем внедрения легирующих компонентов для образования структур, хорошо сопротивляющихся процессам изнашивания; механическим и тепловым воздействием на поверхность металла, которые приводят к структурным и субструктурным превращениям, способствующим повышению стойкости при различных процессах изнашивания; нанесением на поверхности трения деталей износостойких покрытий.

Согласно вышесказанному можно классифицировать многообразие технологических методов повышения износостойкости (рис. 1.1) с учетом того, что в их основе лежат факторы химического, термического и механического воздействий, позволяющие существенно изменить поверхностные свойства изделий.

Разнообразные условия эксплуатации машин и механизмов в сочетании с современными требованиями обуславливают необходимость разработки и совершенствования технологических методов нанесения износостойких покрытий в целях получения биметаллических изделий и для проведения восстановительных операций.

Среди многообразия методов нанесения износостойких покрытий особое место занимают наплавки, при которых за счет тепла внешнего источника подплавляются поверхность покрываемого материала и наплавляемый сплав, в результате чего происходит их взаимодействие с образованием металлургической связи. Из термодинамических условий взаимодействия для этого

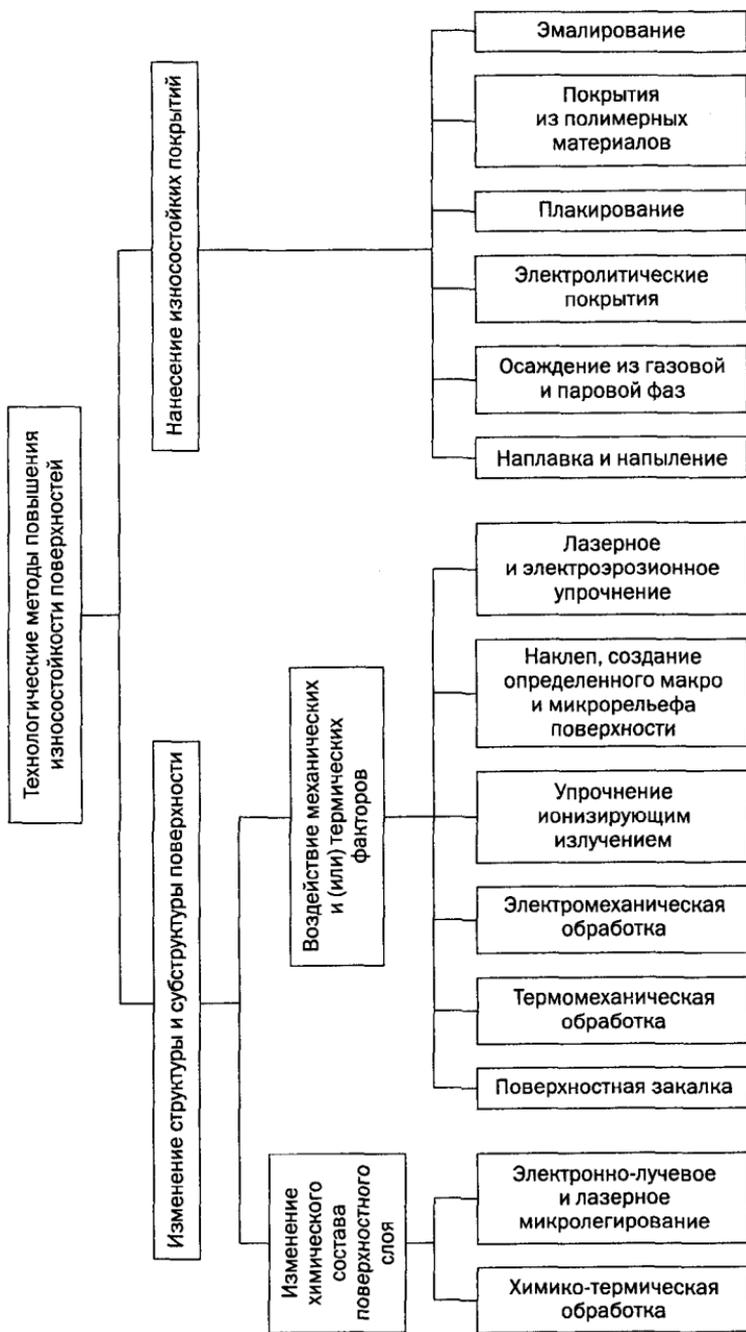


Рис. 1.1. Классификация технологических методов повышения износостойкости поверхностей трения.

необходимо преодолеть определенный энергетический барьер, величина которого характеризуется энергией активации. Нагрев системы повышает ее энтропию, снижает уровень энергии активации, при этом по экспоненциальному закону возрастает число активизированных атомов. Теоретически при температуре 920—1030°C по всей площади контакта «обрабатываемая поверхность — расплав наплавленного материала» может образоваться прочная металлическая связь.

Полная адгезия наплавленных покрытий складывается из сил механического зацепления, сил межмолекулярного взаимодействия (Ван-дер-Ваальсовы силы) и энергии химических связей при образовании нового соединения. Практическая прочность сцепления обычно меньше теоретической из-за дефектов кристаллических решеток контактирующих поверхностей и присутствия трудноудаляемых оксидов, но при качественной наплавке она всегда соизмерима с прочностью основного металла.

1.1. *Современные методы восстановления и упрочнения деталей машин наплавкой*

Технология наплавки обладает преимуществами получения достаточно большой толщины покрытия, высокой производительности, отсутствия ограничений по размерам наплавляемых поверхностей. При этом образуется слой с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью.

В общем объеме работ по восстановлению деталей на ремонтных предприятиях на долю наплавки различных видов приходится порядка 77%, электроконтактного припекания — 6%, гальванических способов — 5%, электро-механической обработки — 4%, заливки жидким металлом — 2%, восстановления полимерами — 4%, других способов — 5% (табл. 1.1 и 1.2).

В настоящее время широко используется много технологических способов для наплавки материалов на восстанавливаемую поверхность детали. Большинство из них достаточно близки по энергетическим параметрам (рис. 1.2). Рассмотрим достоинства и недостатки наиболее перспективных из этих способов.

Табл. 1.1.
Технико-экономические показатели способов нанесения покрытий.

Способ нанесения	Коэффициент производительности	Коэффициент технико-экономической эффективности	Применяемость в ремонте (соединение вал—втулка)
<i>Наплавка:</i>			
под слоем флюса	1,62...1,45	0,436	
вибродуговая	0,85...0,72	0,25	ограниченная
в среде CO ₂	1,82...1,77	0,403	широкая
электроконтактная	2,3...2,1	0,66	
порошковыми проволоками	1,75...1,54	0,4	широкая
ручная дуговая	1	0,314	—
плазменная	2,2...1,9	0,56	
<i>Напыление:</i>			
газопламенное	1,68...1,47	0,39	ограниченная
плазменное	1,76...1,68	0,4	ограниченная
<i>Гальванические покрытия:</i>			
хромирование	0,32...0,22	0,087	—
железнение	1,93...1,77	0,064	—

Табл. 1.2.
Показатели восстановления деталей различными способами.

Способ	Оценочные показатели			
	Расход материала, кг/м	Удельная трудоемкость, ч/м	Удельная себестоимость, руб/м	Удельная энергоемкость, кВтч/м
<i>Наплавка:</i>				
ручная электродуговая	43...57	30...38	59...84	580
ручная аргонодуговая	30	23...30	58...63	520
ручная газовая	38...51	36...33	74...80	80
электродуговая под слоем флюса	38...51	21...24	38...50	286
вибродуговая	35...30	33...36	66...70	234...240
электродуговая в среде CO ₂	30...45	14...21	25...43	250
<i>Гальванические покрытия:</i>				
хромирование	20...24	72...129	80...134	324
железнение	28...43	15...19	29...34	120

Примечание: себестоимость восстановления деталей в ценах 1990 г.

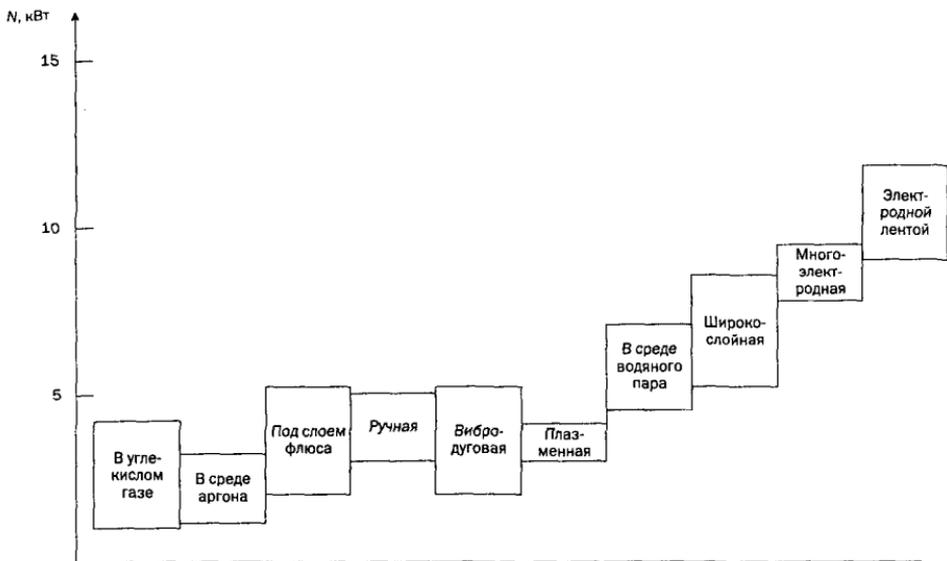


Рис. 1.2. Динамика роста рабочей мощности дуги от способа наплавки.

Плазменная наплавка. Сущность плазменной наплавки заключается в том, что дуга (ток переменный) горит между двумя неплавящимися электродами, или же (ток постоянный) — между одним из неплавящихся электродов и присадочным материалом (рис. 1.3). Высокотемпературная плазменная дуга используется для нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности новых деталей, например, клапанов двигателей. Возможность практического применения струи плазмы определяется ее эффективной тепловой мощностью, скоростью плазменного потока и распределением температуры в струе, которые, в свою очередь, зависят от конструкции сопла горелки, расхода газа и силы тока. Указанные параметры определяют также глубину проплавления, не превышающую 0,1—0,6 мм. Потери теплоты в ходе плазменной наплавки могут достигать 35%.

Наиболее оптимальное рабочее напряжение и температура плазменной струи обеспечиваются в среде аргона и других инертных газов. При наплавке методом **прямой дуги** по отношению к наплавляемой детали применяют сжатую дугу прямого или косвенного действия. В зону наплавки подаются различные присадочные материалы: проволока, две проволоки, порошок одновременно с проволокой, только порошок. Наплавка может производиться по

слою крупнозернистого порошка, заранее насыпанного на поверхность; с подачей порошка в сварочную ванну из основного металла; с подачей порошка в плазменную струю, плавлением его в этой струе и переносом на поверхность изделия.

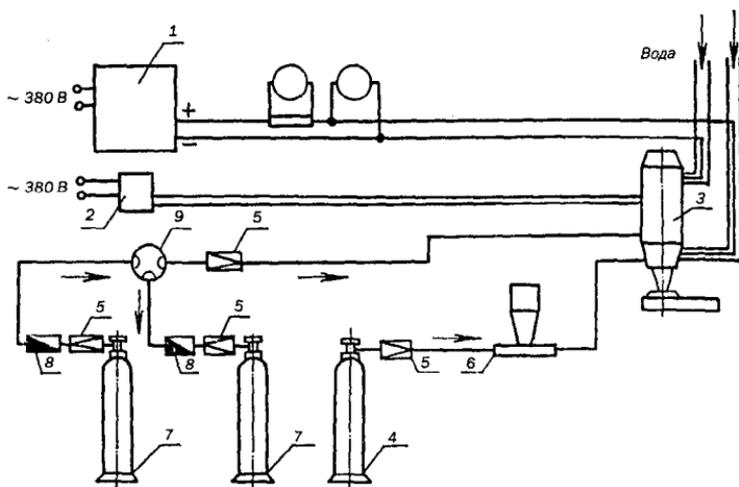


Рис. 1.3. Принципиальная схема установки для плазменной наплавки: 1 — основной источник тока; 2 — источник тока для возбуждения дуги; 3 — плазменная горелка; 4 — баллон с газом для транспортировки наплавочного порошка; 5 — газовый редуктор; 6 — дозатор; 7 — баллон с плазмообразующим газом; 8 — ротаметр; 9 — смеситель.

Метод косвенной дуги отличается от описанного последовательностью и количеством дуг, создаваемых при наплавке. Наплавку можно выполнять одиночными валиками, а также с применением осциллирования на прямой и обратной полярности. При этом предъявляются жесткие требования к скорости перемещения плазмотрона, равномерности прогрева поверхности и условиям расхода газа.

Преимуществом способа плазменной наплавки является его пригодность к автоматизации с применением электронной системы регулирования процесса. Многие зарубежные комплексы наплавки и оборудование комплектуются манипуляторами и роботами, системами управления.

Наплавка под слоем флюса. Способ характеризуется большой производительностью в результате применения высоких плотностей тока; возмож-

ностью управления составом и свойствами наплавленного покрытия за счет дополнительного легирования; возможностью получения толщины покрытия до 0,8—10 мм (рис. 1.4). Наплавка под слоем флюса широко используется для восстановления деталей автомобилей, тракторов и других машин. Наплавляемые материалы — проволоки и ленты различного состава, иногда в зону подается дополнительный присадочный материал. Важной особенностью

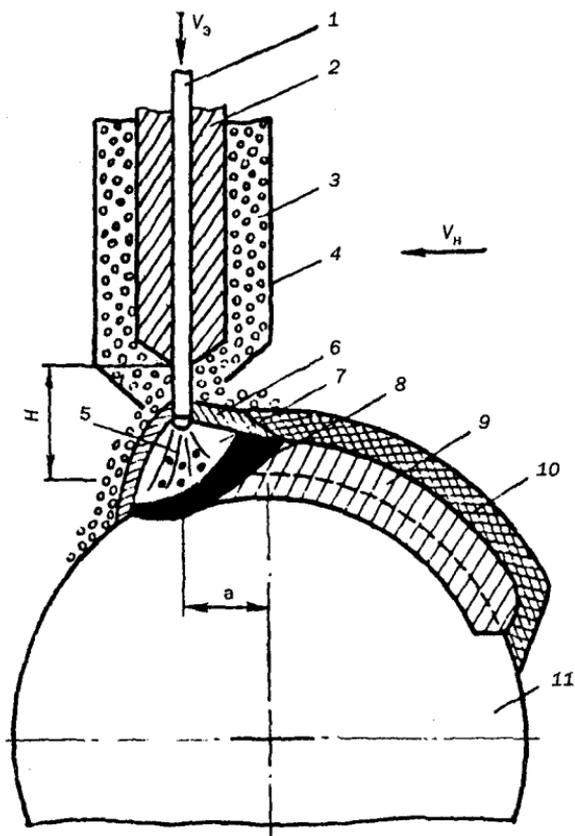


Рис. 1.4. Схема наплавки под слоем флюса цилиндрических деталей:

- 1 — электрод; 2 — мундштук; 3 — флюс; 4 — флюсопровод; 5 — электрическая дуга;
 6 — расплавленный флюс; 7 — газовая (газошлаковая) оболочка;
 8 — расплавленный металл; 9 — наплавленный металл; 10 — шлаковая корка;
 11 — деталь; H — вылет электрода; a — смещение электрода с зенита;
 V_z — скорость подачи электродной проволоки; V_n — скорость наплавки.

способа является простота используемого оборудования и высокая производительность процесса, достаточная его изученность для разработки математических моделей и оптимизации технологических параметров. Существует, однако, ряд недостатков процесса, затрудняющих его использование. К ним относятся: ограниченные возможности процесса, связанные с формой детали (поверхность детали должна быть горизонтальной или близкой к ней); значительное расплавление основного металла, доля которого в наплавленном слое может достигать 65—70%, и, следовательно, проблемы со стабильностью химического состава и свойств наплавленного покрытия; высокий нагрев детали и невозможность наплавки деталей малых размеров; необходимость ручного удаления шлаковой корки.

Вибродуговая наплавка. Способ широко применяется на ремонтных предприятиях в связи с простотой освоения и эксплуатации наплавочных установок, возможностью нанесения слоев толщиной 0,5—3 мм на наружные и внутренние поверхности стальных и чугунных деталей (рис. 1.5). Электродная проволока подается к наплавляемой поверхности детали через мундштук, вибрирующий с частотой до 110 Гц и амплитудой до 4 мм. Благодаря вибрациям наплавку можно производить при напряжениях 12—18 В.

В связи с тем, что на качество соединения наплавляемого и основного металлов влияет большое число факторов, рассматриваемый способ имеет ряд недостатков, в том числе несплавление наносимого слоя с материалом детали; разбрызгивание электродного материала и его повышенный расход; плохое формирование наплавляемого слоя и недостаточная стабильность процесса наплавки; возникновение раковин и пор в наплавляемом слое; значительное термическое воздействие на деталь, приводящее к появлению термических напряжений в детали и трещин в наплавленном слое.

Наплавка в среде защитных газов. Этот способ не требует специальных устройств или защитных флюсов, поскольку дуга между электродом и наплавляемым изделием горит в струе газа, вытесняющего воздух из плавильного пространства и защищающего расплавленный металл от воздействия кислорода и азота (рис. 1.6). В качестве защитной среды обычно используют углекислый газ, а последнее время аргон или их смеси. В ходе процесса отсутствуют вредные выделения или шлаковые корки, возможно легко корректировать процесс, проводить наплавку при различном пространственном

положении наплавляемой поверхности. Вместе с тем процесс имеет сравнительно низкую производительность; характеризуется повышенным разбрызгиванием металла и значительным термическим воздействием на деталь, вследствие чего в наплавленном слое имеется значительная доля основного металла; в ряде случаев требуется применение специальных проволок.

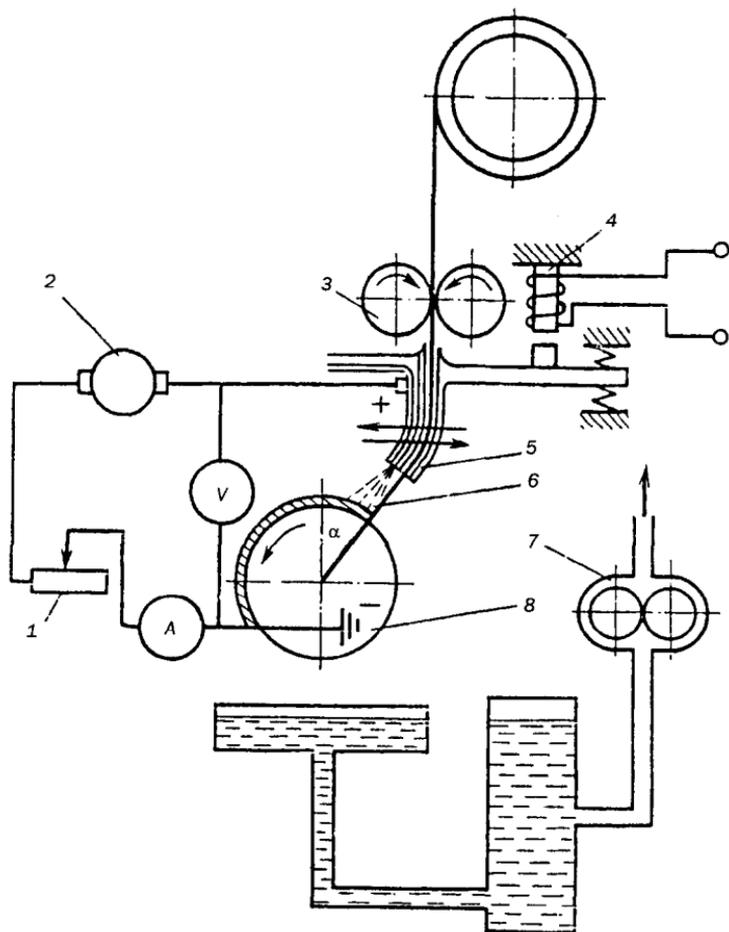


Рис. 1.5. Принципиальная схема установки для вибродуговой наплавки:
 1 — дроссель; 2 — сварочный преобразователь; 3 — механизм подачи электродной проволоки; 4 — вибратор; 5 — мундштук; 6 — электродная проволока; 7 — насос для подачи охлаждающей жидкости; 8 — восстанавливаемая деталь.

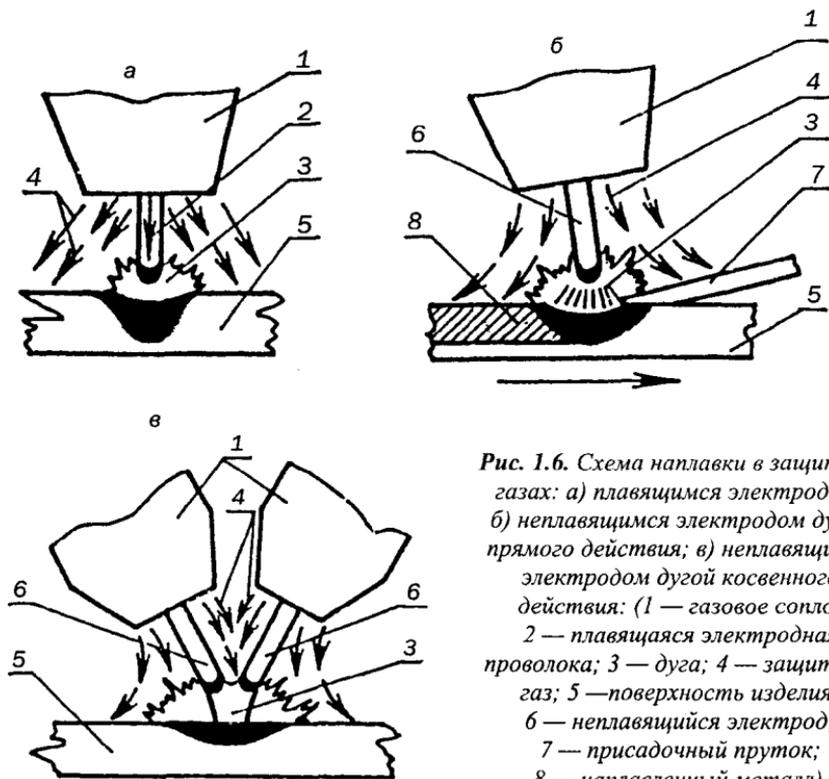


Рис. 1.6. Схема наплавки в защитных газах: а) плавящимся электродом; б) неплавящимся электродом дугой прямого действия; в) неплавящимся электродом дугой косвенного действия: (1 — газовое сопло; 2 — плавящаяся электродная проволока; 3 — дуга; 4 — защитный газ; 5 — поверхность изделия; 6 — неплавящийся электрод; 7 — присадочный пруток; 8 — наплавленный металл).

Электроконтактная приварка. Процесс заключается в приваривании к поверхности детали стальной ленты, проволоки или порошка с помощью мощных электрических импульсов (рис. 1.7). Толщина ленты составляет 0,2—1,5 мм, в том числе учитывается припуск на последующую механическую обработку в пределах 0,2—0,5 мм. Способ имеет высокую производительность. Металл прогревается на небольшую глубину, чем обеспечивается стабильность химического состава и свойств покрытия, не требуется применения флюсов и защитных газов. Вместе с тем для реализации способа необходимы специальные установки и возникает возможность несплавления отдельных участков наплаваемого слоя с основным металлом. Одной из разновидностей такого способа является электроконтактное припекание металлических порошков (рис. 1.8).

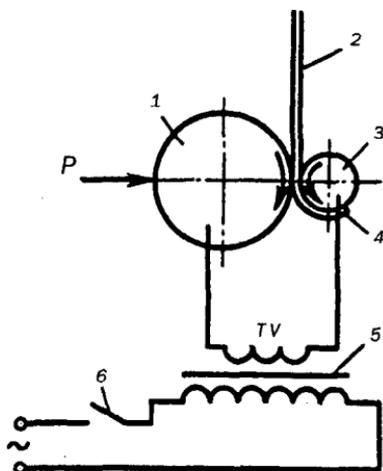


Рис. 1.7. Схема электроконтактной приварки проволоки или ленты:
P — прижимное усилие; 1 — электрод-ролик; 2 — присадочная проволока или лента;
 3 — восстанавливаемая деталь; 4 — наплавленный слой;
 5 — трансформатор; 6 — прерыватель.

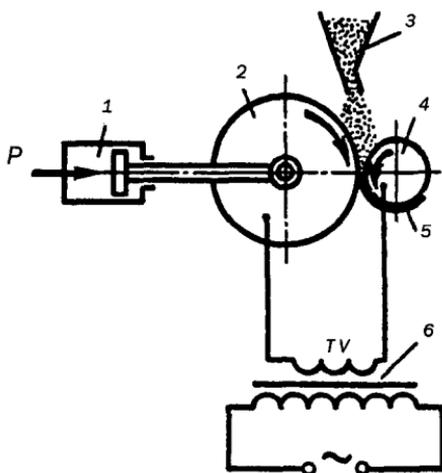


Рис. 1.8. Схема электроконтактного припекания металлических порошков:
P — прижимное усилие; 1 — пневмоцилиндр; 2 — электрод-ролик;
 3 — металлический порошок; 4 — восстанавливаемая деталь;
 5 — напеченный слой; 6 — трансформатор.

Индукционная наплавка. Способ основан на использовании энергии токов высокой частоты для разогрева наплавляемого металла (рис. 1.9). Его основными преимуществами являются универсальность оборудования, небольшой расход наплавочных материалов, высокие механические и эксплуатационные свойства покрытий. Известно много разновидностей индукционной наплавки, среди которых армирование расплавленного поверхностного слоя основного металла присадками; заливка жидкого присадочного металла на подогретый основной слой; погружение подогретой детали в тигель с расплавленным металлом; центробежная заливка; расплавление специальной порошковой шихты, наносимой на упрочняемую поверхность, и др. Основным недостатком способа — невозможность упрочнения валов.

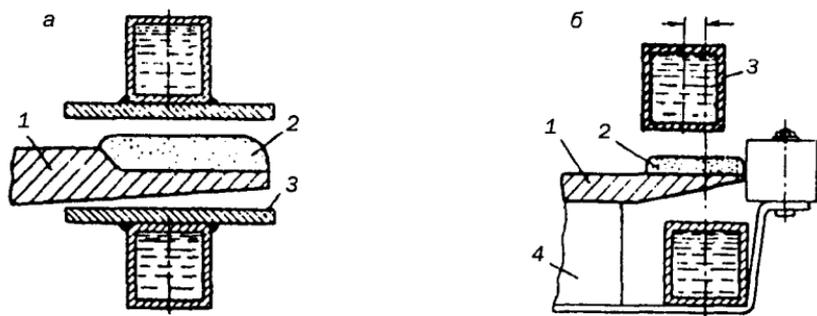


Рис. 1.9. Схема наплавки детали в индукторе (метод НИИТМа):
а) при наплавке лемеха; б) при наплавке лап культиватора
 (1 — деталь; 2 — слой шихты; 3 — индуктор; 4 — опорное приспособление).

Электроискровая наплавка. Основана на том, что при сближении двух электродов происходит электрический разряд, при котором выделяется энергия, достаточная для расплавления частицы металла (рис. 1.10, 1.11). Расплавленные частицы, достигнув поверхности детали, свариваются с ней и происходит адгезия материала катода с материалом детали анода. Формирование поверхностного слоя происходит в результате суммарного действия всех физико-химических процессов на всех этапах формирования покрытия. Температура в зоне контакта достигает свыше 10 000°C. Эти мгновенные, следующие друг за другом импульсы вызывают существенные изменения в структуре поверхностного слоя стали и наплавленного металла, позволяют использовать для наплавки тугоплавкие материалы, например, твердые сплавы.

К основным особенностям электроискровой наплавки можно отнести возможность локальной обработки поверхности (наплавку можно осуществлять в строго определенном месте, не защищая остальную поверхность детали); отсутствие нагрева детали в процессе обработки; высокую прочность сцепления нанесенного материала с основой; отсутствие необходимости специальной предварительной подготовки обрабатываемой поверхности.

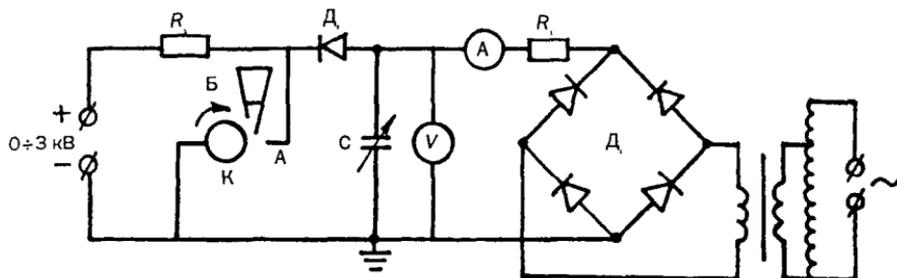


Рис. 1.10. Электрическая схема устройства электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов:

A — рабочий электрод-анод; *K* — деталь-катод; *C* — емкостный накопитель энергии; *D*₁ — выпрямитель; *R*₁ — балластное сопротивление; *R*₂ — токоограничительное сопротивление; *D*₂ — разделительный вентиль; *B* — бункер с порошком.

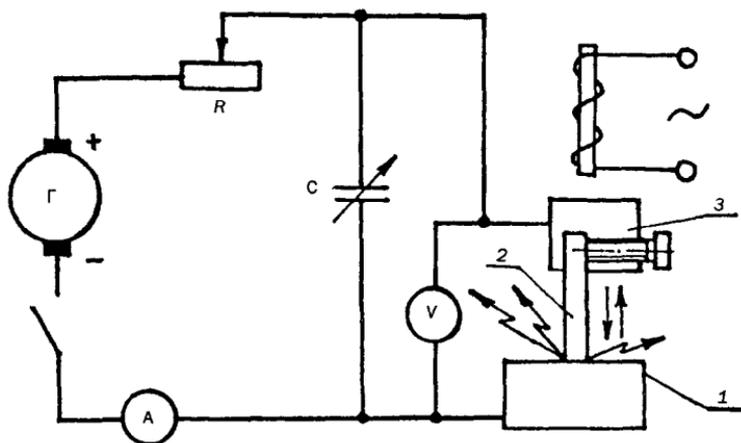


Рис. 1.11. Принципиальная электрическая схема электроискровой установки для наплавки:

1 — деталь; *2* — электрод; *3* — электромагнитный вибратор.

В настоящее время известны две разновидности электроискровой наплавки. В первом случае импульсные разряды возбуждаются при периодическом контактировании электрода-анода с деталью-катодом. Во втором — в межэлектродный промежуток вводится дисперсный материал (порошок). Этот вариант позволяет получить более толстые слои наплавки, расширить гамму наносимых материалов, повысить производительность процесса.

В связи с тем, что нанесенное покрытие имеет значительные неровности и поры, электроискровая наплавка сопровождается одновременно действующим или последующим поверхностным пластическим деформированием, повышающим плотность слоя. Это снижает шероховатость обрабатываемой поверхности и уменьшает остаточные растягивающие напряжения, повышающие усталостную прочность деталей. Шероховатость поверхности уменьшается в 1,2—1,3 раза при использовании в ходе электроискровой наплавки вращающегося магнитного поля.

Электроискровая наплавка применяется в основном для упрочнения режущих инструментов.

Лазерная наплавка. Лазерная наплавка осуществляется путем нанесения покрытия на металлическую основу с использованием энергии лазерного излучения при сохранении химического состава слоя, характерного для наплавляемого материала (рис. 1.12). Процесс происходит с минимальным перемешиванием наплавляемого материала и материала основы в ограниченной по величине зоне контакта (расплавленная ванна-основа). Наносимый материал может быть подан в зону наплавки в форме прутка, полосы или порошка. При расплавлении наплавляемого материала могут протекать реакции, проходящие с поглощением и с выделением тепла, что может оказывать влияние на величину энергии, необходимой для реализации наплавки. Взаимодействие концентрированного потока электромагнитного излучения с материалом мишени и атмосферой может приводить к образованию плазмы, наличие которой снижает поступление энергии к поверхности образца. Целесообразно использовать порошковые материалы в виде обмазки на основе связующего вещества, повышающего поглощение энергии излучения, либо вводить в состав наплавочной композиции материалы, имеющие низкую температуру плавления, так как при достижении температуры плавления или состояния, близкого к нему, поглощение излучения возрастает практически до 100%.

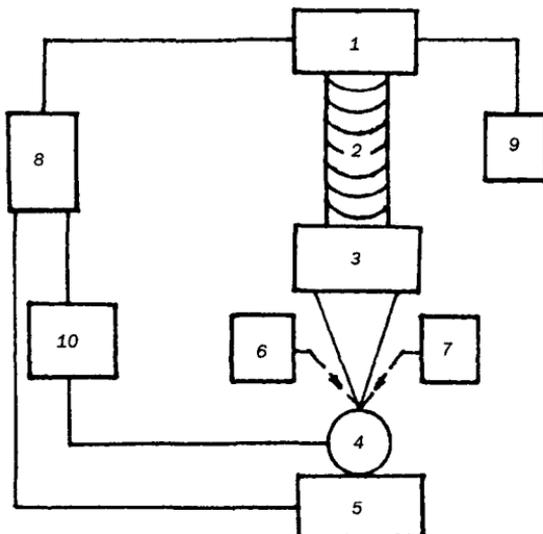


Рис. 1.12. Структурная схема лазерной установки:

- 1 — оптический квантовый генератор; 2 — система излучения лазера;
 3 — оптическая система; 4 — восстанавливаемая деталь;
 5 — устройство для закрепления и перемещения восстанавливаемой детали;
 6 — система передачи технологической среды; 7 — источник вспомогательной энергии; 8 — программное устройство; 9 — датчик параметров излучения;
 10 — датчик параметров технологического процесса.

При лазерном оплавлении порошковых паст (шликеров) наиболее важным является выбор связующего вещества для приготовления пасты. Возникновение сажеобразных продуктов сгорания приводит к выбрасыванию порошка из зоны и периодической экранировке излучения. В результате образуются швы с большим коэффициентом перемешивания материалов основы и покрытия, переменной глубиной проплавления и невысоким содержанием легирующих элементов в слое. Хорошие результаты получены при использовании паст на нитроцеллюлозной основе с небольшим содержанием сухого остатка (цапон-лак, клейстер). Недостатком процесса является то, что при формировании наплавленного валика-слоя по обеим сторонам на поверхности могут образовываться дефектные зоны.

Лазерная наплавка осуществляется также с подачей порошка непосредственно в зону воздействия лазерного луча, в частности с помощью инжекторного устройства. Формирование наплавляемого валика при этом идет путем постепенного наращивания слоя от основания к поверхности, тогда как при оплавлении порошковых паст — от поверхности к основе. Процесс характеризуется минимальным тепловым воздействием на материал основы, удельная энергия при наплавке валика высотой около 1 мм равна 30—50 Дж/мм², при наплавлении порошковой пасты — около 60—90 Дж/мм², а при напылении плазменного слоя — 180—330 Дж/мм².

Микроструктура наплавленных лазером слоев существенно отличается от микроструктуры слоев, полученных другими методами. Ее особенность — мелкозернистость — отсутствие крупных карбидов. После лазерного переплава с удельной энергией в пределах от 10 до 240 Дж/мм² карбиды имеют размер не более 5—20 мкм, а при возрастании энергии образуется структура квазиэвтектического типа. Разброс микротвердости изменяется от 3700—23 000 МПа при наплавке ТВЧ до 7900—8900 МПа при лазерной наплавке.

Сравнительная оценка износостойкости при трении скольжении показала, что стойкость сплавов ПГ-СР, наплавленных лазером, в 3—5 раз выше, чем плазменного покрытия, оплавленного горелкой, и более 10 раз — чем у наплавленных токами высокой частоты.

Одним из основных недостатков порошковой лазерной наплавки является возникновение трещин в наплавленном слое. Обычно образуются поперечные трещины, идущие перпендикулярно к линии оплавления или под углом 45°. Наиболее приемлемым средством уменьшения трещинообразования является подбор соответствующих скоростей наплавки при различной плотности энергии. Порошковая наплавка находит применение для упрочнения деталей с небольшими размерами зон упрочнения. Снижение пористости и шероховатости поверхности достигается при лазерном оплавлении напыленных газотермических покрытий, что является решающим при восстановлении поверхностей большой площади, несмотря на относительно высокую энергоемкость процесса.

Весьма близка к лазерной наплавке порошковых сплавов **электронным пучком**, однако этот процесс не нашел пока широкого применения в производстве.

1.2. Электромагнитная наплавка

Для восстановления и упрочнения деталей машин весьма перспективными являются электрофизические методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии. Электромагнитная наплавка (ЭМН) является одним из таких методов. Она позволяет реализовать в едином технологическом процессе восстановление геометрических размеров и увеличение срока службы деталей за счет упрочнения — повышения износостойкости рабочей поверхности. Метод основан на использовании энергии магнитного поля, выступающей в качестве связки зерен порошка на железной основе, находящихся в подвижно-связанном и скоординированном состоянии относительно обрабатываемой поверхности, и электрической, расплавляющей зерна порошка и микрогребешки восстанавливаемой или упрочняемой поверхности.

На рис. 1.13 приведены схемы ЭМН, отражающие сущность метода на примере восстановления и упрочнения наружных поверхностей тел вращения. Заготовка 1 располагается на некотором расстоянии от полюсного наконечника 4 сердечника 5 электромагнитной катушки 6. Сердечник и заготовка подключаются к источнику электрического тока. В зазор между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником подается порошок 2 из дозатора-бункера 3. Порошок обладает магнитными свойствами, его частицы выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля и замыкают электрическую цепь «деталь-наконечник». Зерна порошка под действием энергии проходящего по ним тока нагреваются, расплавляются, и капли расплава порошка переносятся на обрабатываемую поверхность вращающейся детали.

Вид, интенсивность и характер преобразования вводимой энергии — это главное, что определяет условия нанесения покрытия, так как без этого невозможна активация соединения расплавленного порошка с поверхностью обрабатываемой детали. Вводимый порошок обеспечивает формирование покрытия на восстанавливаемой или упрочняемой поверхности с заданными физико-химическими и механическими свойствами.

Следует отметить, что при ЭМН характер переноса расплава порошка в рабочей зоне (пространстве между полюсным наконечником и обрабатываемой поверхностью детали) на обрабатываемую поверхность зависит от многих факторов. Однако энергия электрического и магнитного полей и пути ее

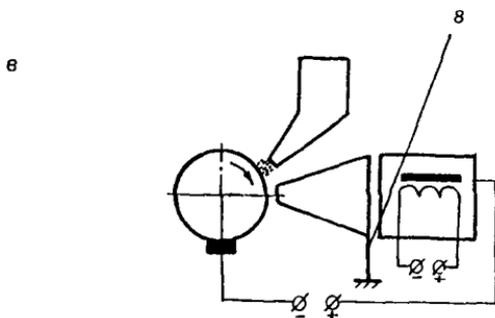
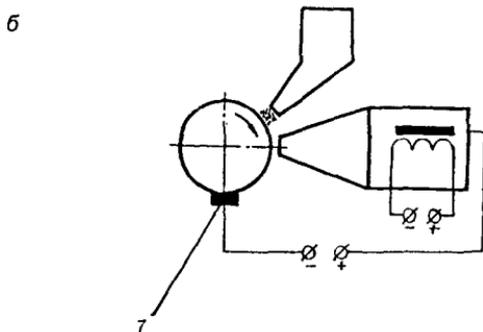
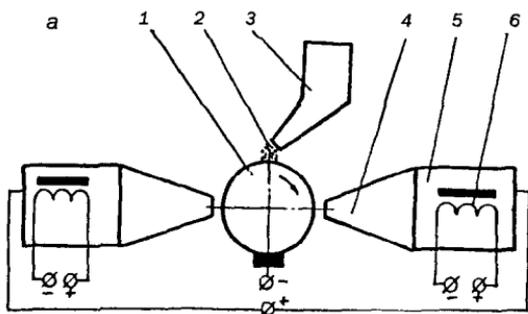


Рис. 1.13. Принципиальные схемы электромагнитной наплавки наружных поверхностей тел вращения: а) двухполюсная; б) однополюсная; в) однополюсная с вибрацией полюсного наконечника (1 — восстанавливаемая деталь; 2 — порошок; 3 — бункер-дозатор; 4 — полюсный наконечник; 5 — сердечник электромагнита; 6 — электромагнитная катушка; 7 — скользящий контакт; 8 — пластинчатая пружина).

преобразования — доминирующие факторы, определяющие характер метода нанесения покрытия как физико-химического явления. Следовательно, с учетом термодинамики метод ЭМН — это процесс восстановления и (или) упорочнения детали в постоянном магнитном поле путем монолитного соединения расплавленного порошка с материалом детали в результате введения и термодинамического необратимого преобразования энергии и вещества в месте нанесения покрытия. Монолитность соединения обеспечивается появлением атомно-молекулярных связей между элементарными частицами соединяемых веществ.

При ЭМН в процессе нанесения покрытия в рабочей зоне энергией магнитного поля формируется многоэлектродная система, в которой цепочки зерен порошка хаотически контактируют с обрабатываемой поверхностью. Плавление цепочек-электродов происходит дискретно за счет периодического возникновения дугового разряда на каждом из них. При этом поверхность металла основы также частично подвергается расплавлению, вследствие чего происходит диффузия в поверхностном слое обрабатываемой детали и возникают диффузионные зоны сцепления покрытия с основой. Процесс сопровождается протеканием агрегатных превращений в наносимом материале и частично в основе. Импульсный характер подвода энергии сближает ЭМН с вибродуговой наплавкой и электроискровым легированием. Формирование импульсов при ЭМН осуществляется как при вибродуговой наплавке, в отличие от электрического, применяемого при электроискровом легировании.

Таким образом, основываясь на том, что при ЭМН основную роль — нагрев и плавление присадочного материала — выполняет энергия электрического поля, а вспомогательную — удержание порошка и формирование цепочек-электродов в рабочей зоне — энергия магнитного поля, метод нанесения покрытия из материала ферропорошка импульсами разрядного тока в магнитном поле назван **электромагнитной наплавкой**.

Для реализации процесса ЭМН создаются установки с двухполюсной (рис. 1.13, а) и однополюсной (рис. 1.13, б, в) магнитными системами. Первая обеспечивает более высокую стабильность и производительность наплавки, вторая и третья — обладают большей универсальностью.

Перспективным является **метод электромагнитной обработки с поверхностным пластическим деформированием (ЭМН с ППД)** (рис. 1.14).

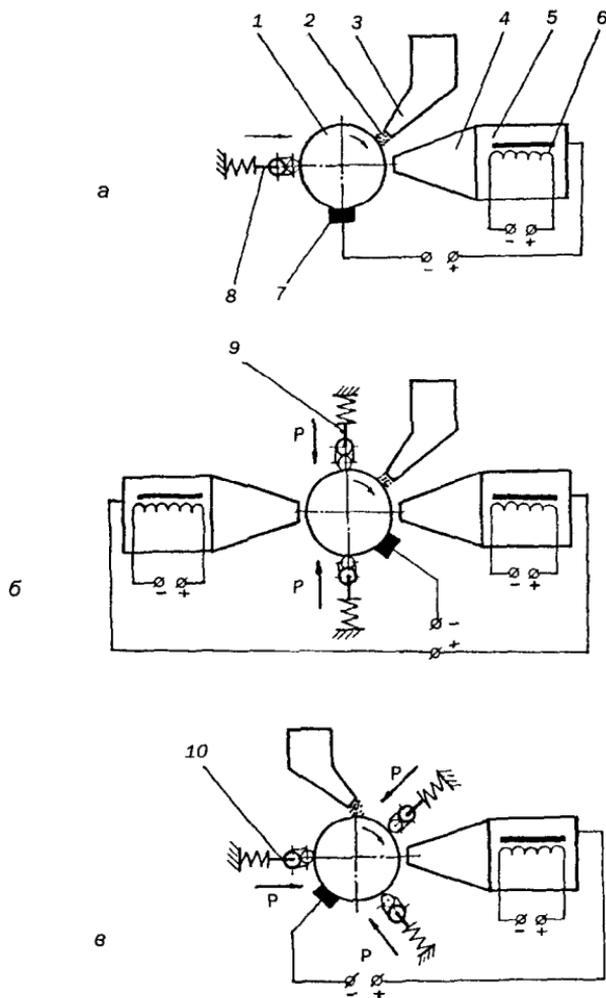


Рис. 1.14. Принципиальная схема метода электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием наружных поверхностей тел вращения: а) однополюсная с одношариковым накатником; б) двухполюсная с двухшариковым накатным устройством; в) однополюсная с трехшариковым накатным устройством (1 — восстанавливаемая деталь; 2 — порошок; 3 — бункер-дозатор; 4 — полюсный наконечник; 5 — сердечник электромагнита; 6 — электромагнитная катушка; 7 — скользящий контакт; 8 — одношариковый накатник; 9 — двухшариковое накатное устройство; 10 — трехшариковое накатное устройство).

Поверхностное пластическое деформирование уменьшает шероховатость поверхности покрытия, увеличивает его твердость и формирует в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения, повышающие усталостную прочность обработанных деталей.

Для повышения сплошности покрытия при ЭМН используют устройства с пульсирующим магнитным полем и вибрацией полюсного наконечника (рис. 1.13, в). На производительность процесса ЭМН оказывают влияние параметры полюсных наконечников (угол заострения полюсного наконечника и высота его рабочего торца), изменением которых можно влиять на магнитную индукцию в рабочем зазоре и тем самым целенаправленно управлять процессом. Оптимальными значениями угла заострения и высоты рабочего торца полюсного наконечника следует считать $\alpha = 12$ и $h = 6$ мм соответственно. При больших значениях α увеличивается магнитный поток рассеивания и уменьшается градиент магнитной индукции, вследствие чего хуже удерживается порошок в рабочей зоне. Изменение высоты рабочего торца приводит к изменению электрической проводимости рабочего зазора, что отражается на плотности разрядного тока, от которого зависит производительность процесса.

Важным условием реализации процесса ЭМН является равномерная во времени и по ширине полюсного наконечника подача порошка в рабочую зону. Для непрерывной подачи порошка наиболее надежным в работе является бункерное дозирующее устройство вибрационного типа. Подача порошка в рабочую зону в потоке рабочей жидкости обеспечивает не только стабильность протекания процесса наплавки покрытия, но и повышение его производительности и сплошности покрытия. Рабочая жидкость при этом должна удовлетворять следующим условиям: низкая коррозионная активность к материалам порошков и обрабатываемой детали; высокая температура вспышки; хорошая фильтруемость; отсутствие запаха и низкая токсичность. В качестве рабочей жидкости широко используются *эмульсол* и *аквол*. Значительное повышение стабильности процесса и равномерности нанесения покрытия по толщине достигается при использовании в рабочей жидкости солей калия, кальция, натрия и др.

Метод ЭМН реализуется при различных источниках разрядного тока, но выбор его имеет большое значение, так как производительность наплавки зависит от параметров электрических импульсов. Наибольшее применение в

производстве нашли сварочные выпрямители ВД-401, которые позволяют регулировать силу разрядного тока в пределах 60—500 А.

При подключении магнитной системы установок для ЭМН к источникам питания необходимо учитывать взаимную направленность электрического тока и магнитной индукции. Возможны четыре схемы подключения (рис. 1.15). Так, наибольшую производительность и сплошность покрытия обеспечивает схема рис. 1.15, б; наибольшую микротвердость покрытия — схема рис. 1.15, в; наименьшую микротвердость зоны термического влияния — схема рис. 1.15, г; наименьшую производительность — схема рис. 1.15, а.

Производительность процесса ЭМН и качество покрытий зависят от большого числа переменных факторов. Для управления процессом ЭМН разработаны структурно-функциональные схемы процесса ЭМН и формирования покрытия (рис. 1.16 и рис. 1.17), представляющие собой совокупность различных параметров и оценивающих их влияние на конечный результат (эксплуатационные характеристики изделия).

Видно (рис. 1.16), что процесс ЭМН можно разделить на четыре фазы: 1 — формирование многоэлектродной системы из зерен порошка в рабочей зоне; 2 — генерация и развитие электрического разряда, плавление порошка; 3 — перенос капель расплава порошка на обрабатываемую поверхность; 4 — взаимодействие наплавляемого материала с основой, формирование покрытия. Каждая из фаз характеризуется своими входными и выходными параметрами и определяется физическими процессами и конструктивными особенностями исполнительных механизмов.

На рис. 1.17 представлена структурно-функциональная схема формирования покрытия. Видно, что основными факторами, влияющими на формирование покрытий, их физико-механические и эксплуатационные свойства являются энергия электрических разрядов, температура в системе покрытие—основа и остаточные напряжения.

Структурно-функциональные схемы процесса отражают закономерности происходящих при ЭМН явлений, позволяют определить основные факторы, влияющие на формирование покрытий. Они имеют методологическое значение для дальнейшего совершенствования процесса ЭМН и оборудования на основе системного подхода.

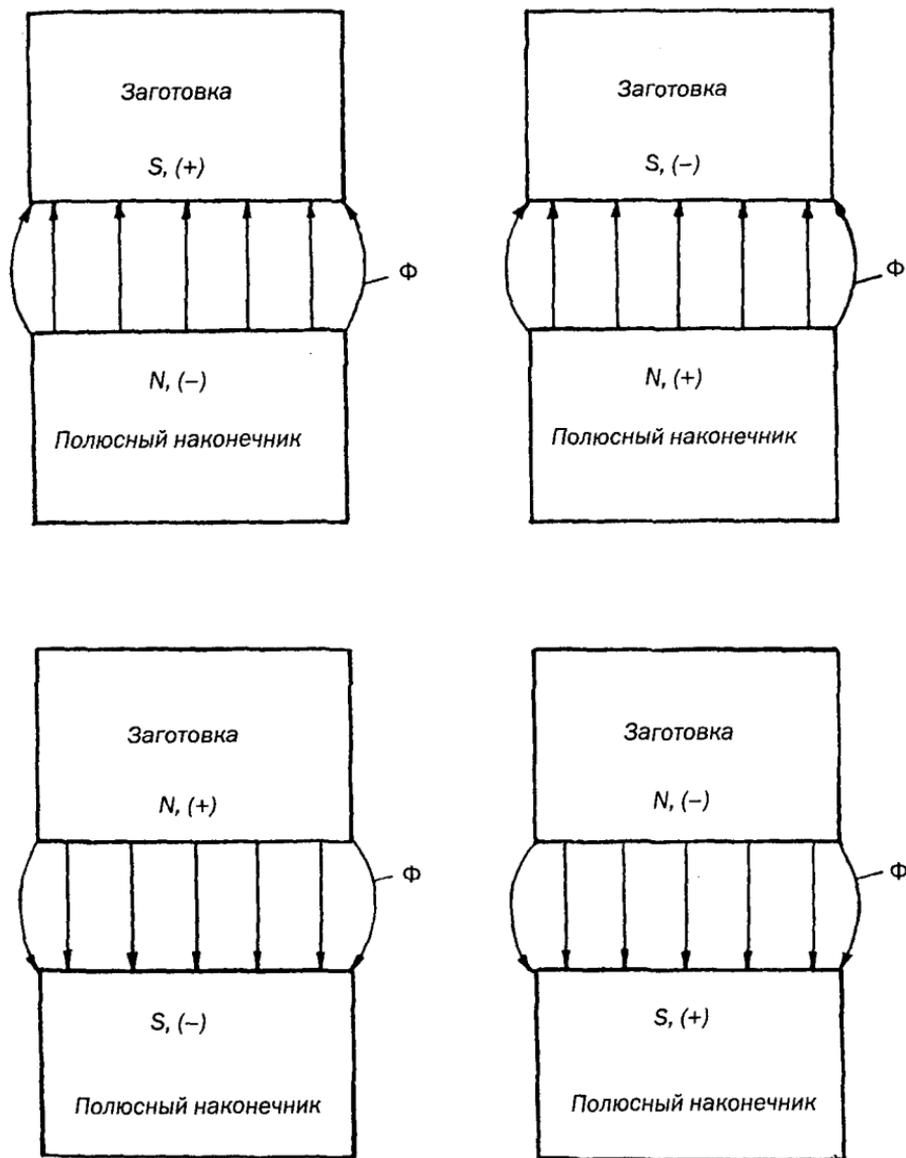


Рис. 1.15. Схема взаимного расположения заготовок-деталей и полюсных наконечников при электромагнитной наплавке: N, S — магнитная полярность; (+), (-) — электрическая полярность; Φ — магнитный поток.

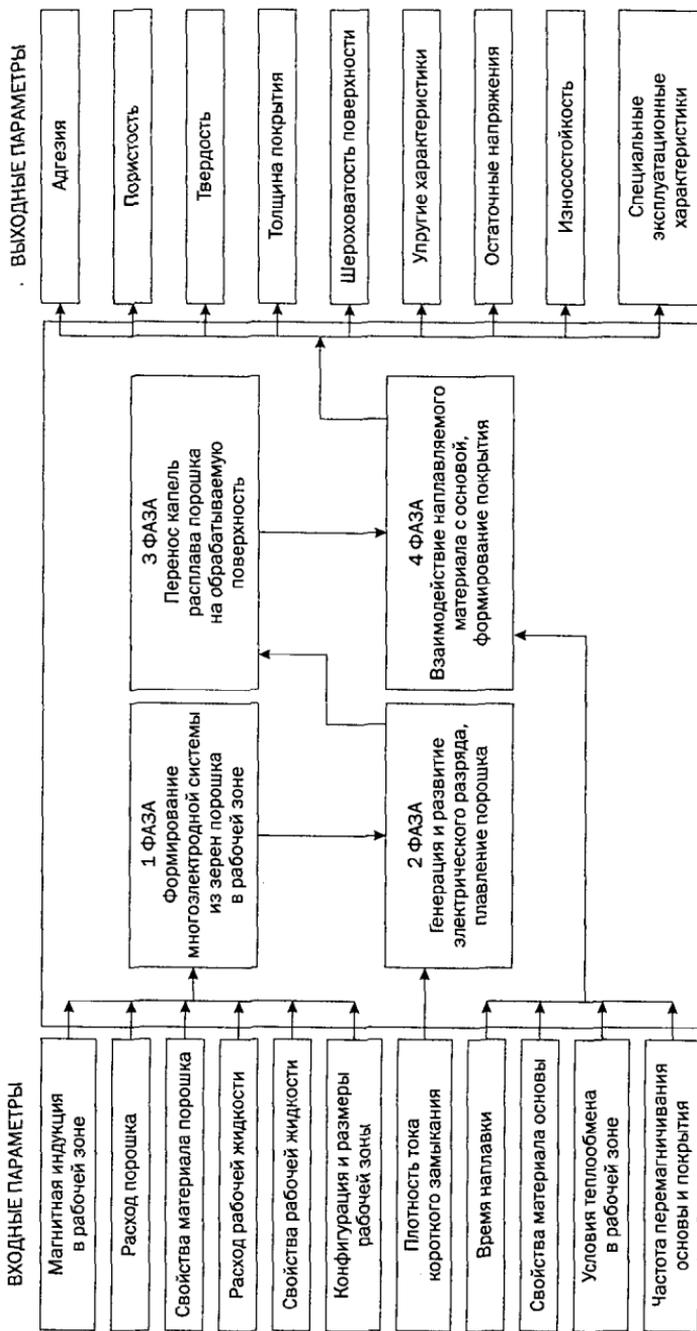


Рис. 1.16. Структурно-функциональная схема процесса электрошлаковой наплавки.

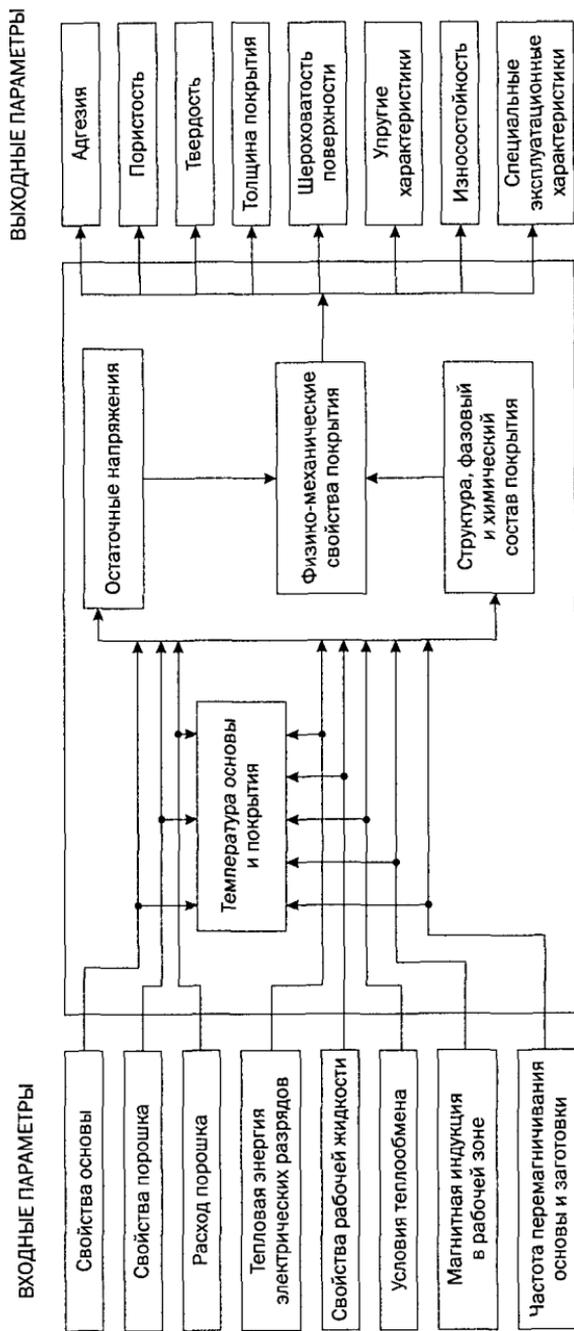


Рис. 1.17. Структурно-функциональная схема формирования покрытия при электромагнитной наплавке.

1.3. Требования к методам восстановления и упрочнения

Работоспособность деталей, восстановленных наплавкой, определяется химическим составом и структурой наплавленного слоя, его твердостью, износостойкостью, ударной вязкостью и усталостной прочностью. Наплавленный металл по химическому составу и строению отличается от состава электродного металла и детали. Жидкий металл, взаимодействуя в ходе наплавки с расплавленным шлаком, водяными парами и окружающим воздухом, окисляется и насыщается азотом, водородом и другими элементами. Повышенное содержание кислорода и азота в наплавленном металле придает ему твердость и хрупкость, способствует образованию трещин и пор, ухудшает структуру материала. Это накладывает жесткие требования на подбор химического состава наплавочного материала, рационального способа и режима восстановления и упрочнения. Правильный выбор данных параметров позволяет управлять структурой покрытия, а значит, его твердостью и износостойкостью. В ходе наплавки в детали возникают внутренние напряжения вследствие изменения температурного и объемного состояния и отсутствия свободного перемещения нагреваемых участков. Эффективным средством для создания в металлопокрытиях напряжений сжатия является пластическая деформация поверхностей слоев.

В процессе восстановления и упрочнения детали на ее поверхности образуется слой металла с измененной структурой, фазовым составом, физико-химическими и механическими свойствами по сравнению с основным металлом. Этот слой, называемый поверхностным, оказывает существенное влияние на надежность и долговечность работы детали, определяя ее физико-химические и эксплуатационные свойства (рис. 1.18).

Подводя итог вышеизложенному, можно сформулировать требования к «идеальному» процессу восстановления и упрочнения деталей; конструированию оборудования на модульной основе (рис.1.19):

- процесс должен быть высокопроизводительным, с экономным расходом энергии и материалов, гигиеничным и безопасным;
- используемое технологическое оборудование должно быть универсальным, простым в изготовлении и эксплуатации, легко автоматизироваться;
- основное время обработки должно быть минимальным, чтобы структура наносимого сплава не претерпевала нежелательных изменений, а основной металл не подвергался оплавлению;



Рис. 1.18. Схема связи активной восстановленной поверхности детали с физико-химическими и эксплуатационными свойствами.

- между основным металлом и нанесенным слоем покрытия должно существовать надежное и прочное соединение;
- в восстановленных деталях должны отсутствовать значительные термические напряжения, поры, трещины и т. п.;
- для надежного устранения макродефектов процесс должен обеспечивать возможность одновременного и последовательного внешнего механического воздействия, например, поверхностного пластического деформирования.

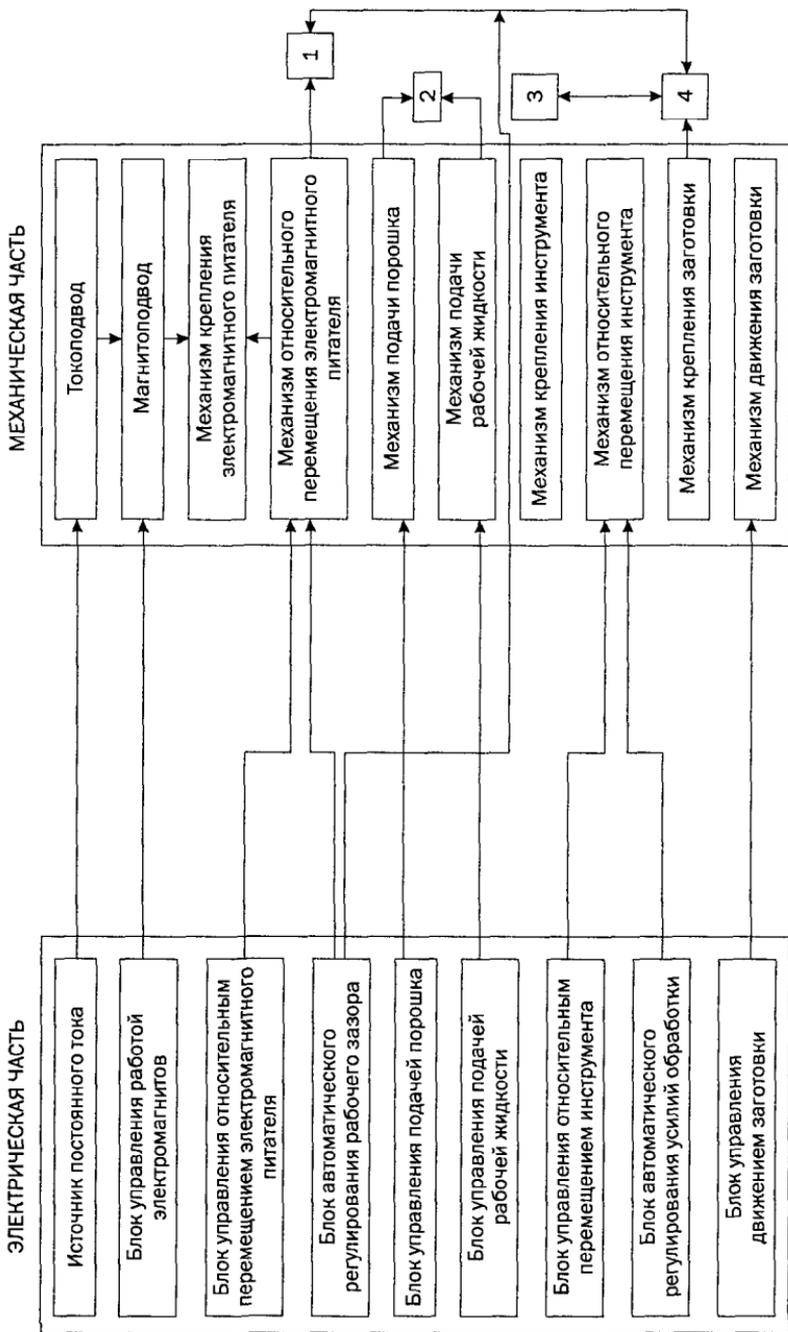


Рис. 1.19. Обобщенная структурная схема гибкого производственного модуля для ЭМН: 1 — полюсный наконечник; 2 — бункер-дозатор; 3 — инструмент с держателем; 4 — заготовка.

2. КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

2.1. Явления, происходящие в рабочей зоне устройств для электромагнитной наплавки

Область пространства между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником, в которой происходит формирование поверхностного слоя заготовки при ЭМН, называется **рабочей зоной**. При ЭМН рабочая зона заполняется порошком, зерна которого под воздействием постоянного магнитного поля выстраиваются вдоль магнитных силовых линий, образуя токопроводящие цепочки-электроды. В момент касания последних обрабатываемой поверхности происходит замыкание электрической цепи «источник тока — полюсный наконечник — заготовка — источник тока» и в рабочей зоне развивается дуговой разряд, в результате которого расплавляются зерна порошка, и образовавшийся расплав под воздействием сил электрического и магнитного полей переносится на поверхность заготовки.

В рабочей зоне всегда магнитный поток распределен неравномерно, что обусловлено геометрическими размерами полюсного наконечника и обрабатываемой заготовки. При использовании двухполюсной установки магнитный поток у поверхности заготовки больше, чем у поверхности рабочего торца полюсного наконечника, а при однополюсной — наоборот.

При внесении в рабочую зону магнитным полем зерен порошка, в ней возникает градиент магнитной индукции $\overrightarrow{grad} B$, направленный в сторону полюсного наконечника. В этом случае величина силы, действующей на зерно порошка в направлении вектора $\overrightarrow{grad} B$, определяется по формуле

$$F = \frac{4 \mu a^2 b \chi H}{3 R_0 + \Delta},$$

где μ — магнитная проницаемость материала порошка, Гн/м; a, b — размеры большой и малой осей эллипсоида, м; χ — магнитная восприимчивость материала порошка, Гн/м; H — напряженность магнитного поля у верхней границы зерна, А/м; R_0 — радиус обрабатываемой заготовки, м; Δ — величина рабочего зазора, м.

При ЭМН полюсный наконечник, обрабатываемая заготовка и цепочка зерен порошка приобретают магнитную и электрическую полярность. Плавление цепочек-электродов (порошка), контактирующих с обрабатываемой поверхностью, в рабочей зоне происходит дискретно за счет возникновения кратковременного электрического разряда на каждом из них. Возникновение и протекание дугового разряда определяется воздействием электрических, магнитных, химических и других факторов. Дуга горит в месте наименьшего расстояния между обрабатываемой заготовкой и наконечником при минимальном сопротивлении и падении напряжения. Скорость возникновения дугового разряда и время его существования оказывают влияние на производительность процесса ЭМН, глубину зоны термического влияния и равномерность распределения капель расплава металла по обрабатываемой поверхности. Частота возникновения импульсов зависит от силы разрядного тока, напряжения, зернистости порошка, скорости вращения заготовки, состава окружающей среды и других факторов.

В рабочей зоне может происходить один или несколько дуговых разрядов одновременно. При постоянном токе процесс ЭМН осуществляется в импульсном режиме. Длительность и частота возникновения импульсов непостоянны. Форма импульсов трапецеидальная (рис. 2.1, а), возникновение импульса на одной из цепочек по времени никогда не совпадает с моментом возникновения импульсов на других. В большинстве случаев возникающий импульс подавляет течение дуговых разрядов на соседних цепочках-электродах. При одновременном возникновении нескольких импульсов их амплитуды меньше амплитуды тока одиночного импульса. В паузах между дуговыми разрядами сила разрядного тока вначале падает до минимального значения I_{min} , а затем снова нарастает (рис. 2.1). Повторный импульс может произойти в системе без замыкания, путем ионизации газов в рабочей зоне действием дугового разряда на соседней цепочке.

Процесс плавления цепочек-электродов для многоэлектродной системы не отличается от плавления одиночной цепочки. Однако поведение многоэлектродной системы в этих условиях имеет некоторые особенности. Система может быть настроена таким образом, что в рабочей зоне будет преобладать одиночное пульсирующее горение цепочек-электродов (рис. 2.1, б). В этом

случае процесс ЭМН идет неустойчиво, формирование поверхностного слоя нестабильно, расход электроэнергии минимальный, производительность невысокая. Когда же в рабочей зоне преобладает групповое перекрываемое горение цепочек-электродов (рис. 2.1, в), процесс идет устойчиво, обеспечивается его стабильность и формирование покрытия.

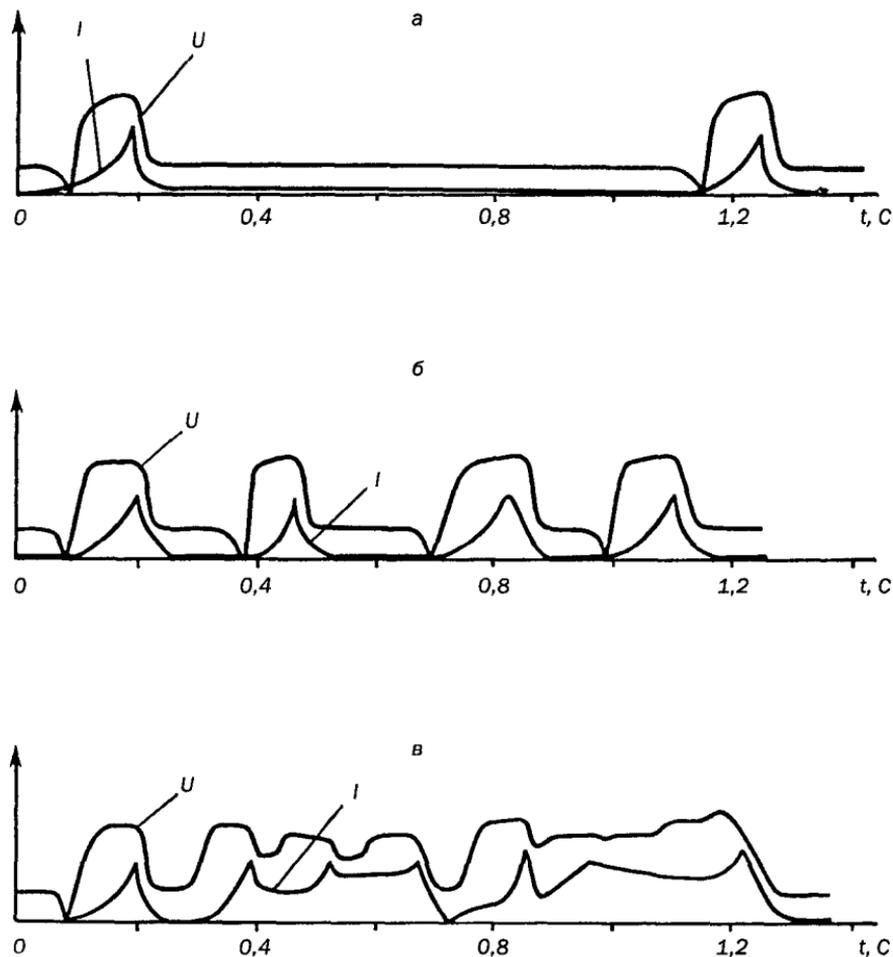


Рис. 2.1. Осциллограмма процесса электромагнитной наплавки:
 а) замыкание рабочего зазора одиночными цепочками-электродами;
 б) одиночное неперекрываемое горение цепочек-электродов;
 в) групповое перекрываемое горение цепочек-электродов.

На рис. 2.2 показана зависимость частоты импульсов разрядного тока от расхода порошка, магнитной индукции в рабочей зоне и плотности разрядного тока. Видно, что только одна зависимость для плотности разрядного тока носит экстремальный характер.

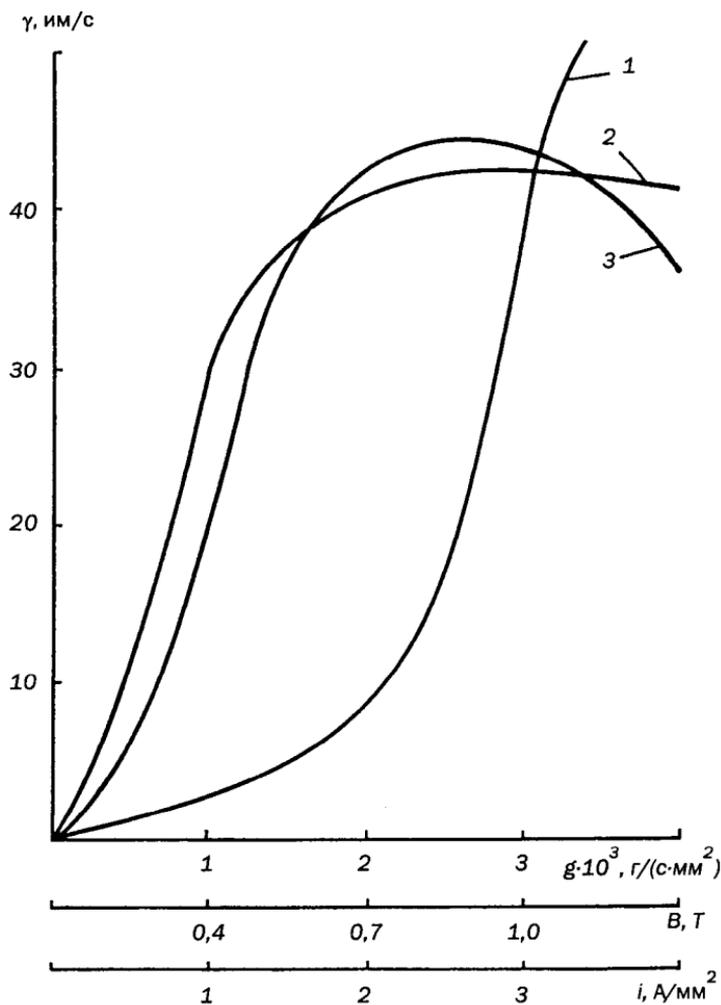


Рис. 2.2. Зависимость частоты импульсов разрядного тока γ от расхода ферропорошка g (1), магнитной индукции в рабочей зоне B (2) и плотности разрядного тока i (3).

Нагрев и плавление порошка повышается благодаря взаимному влиянию дуговых разрядов в многоэлектродной системе. Равномерность теплового вложения в заготовку обеспечивает импульсное течение процесса ЭМН, при этом в рабочей зоне поддерживается высокий тепловой градиент. При малой силе разрядного тока ($I < 80$ А) и большом расходе порошка ($g > 2,6$ г/(с·мм²)) в рабочей зоне энергии электрического поля недостаточно для возбуждения дугового разряда. В этом случае процесс перестает носить импульсный характер (осциллограмма силы разрядного тока представляет прямую линию), так как выделяемой теплоты недостаточно для расплавления порошка и основы. Происходит спекание порошкового материала, отсутствует адгезия между материалом матрицы и покрытием, которое разрушается при незначительном внешнем воздействии.

2.2. Магнитное поле и его роль при электромагнитной наплавке

2.2.1. Силы, действующие на единичное зерно порошка. На каждое зерно ферромагнитного порошка, находящееся в рабочей зоне, действуют магнитные, электромагнитные и механические силы. Состав этих сил определяется характером внешнего магнитного поля, магнитными и электропроводными свойствами материала порошка, формой и размерами зерен, свойствами применяемой рабочей жидкости. В общем случае на единичное зерно порошка в рабочей зоне при отсутствии импульсов электрического тока действует результирующая сила

$$\vec{F}_{\Sigma} = \vec{F}_m + \vec{F}_{m1} + \vec{F}_{эм} + \vec{F}_{эм1} + \vec{F}_T + \vec{F}_{ин} + \vec{F}_{мд} + \vec{F}_{тр},$$

где \vec{F}_m — сила, вызванная магнитным взаимодействием токов материала зерна с внешним полем; \vec{F}_{m1} — сила, вызванная стремлением зерна сориентироваться вдоль силовых линий магнитного поля; $\vec{F}_{эм}$ — сила электромагнитного взаимодействия индукционных токов зерна с внешним полем; $\vec{F}_{эм1}$ — сила электромагнитного взаимодействия индукционных токов зерна, движущегося в рабочей зоне; \vec{F}_T — сила тяжести; $\vec{F}_{ин}$ — сила инерции, возникающая при соприкосновении зерна с движущейся обрабатываемой поверхностью; $\vec{F}_{мд}$ — сила механического давления; $\vec{F}_{тр}$ — сила трения в порошковой среде.

Силы механического давления $\vec{F}_{\text{мд}}$ и $\vec{F}_{\text{тр}}$, действующие на отдельное зерно со стороны порошковой среды, могут быть определены только при расчете взаимодействий зерна с порошковой средой в рабочем зазоре. Пренебрегая силами малой величины, ограничимся рассмотрением только сил магнитного взаимодействия сред $\vec{F}_{\text{м}}$, $\vec{F}_{\text{м1}}$ и инерционных $\vec{F}_{\text{ин}}$ сил.

Л. Д. Ландау и Е. М. Лившиц представили зависимость для магнитной силы, действующей на тело, помещенное в магнитное поле, в виде

$$\vec{F}_{\text{м}} = \frac{1}{\mu_0} \oint_s \left[\vec{B}(\vec{n} \cdot \vec{B}) - \frac{1}{2} B^2 \vec{n} \right] ds, \quad (2.1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; \vec{B} — вектор магнитной индукции, действующий на элементарной поверхности ds ферромагнитного тела; \vec{n} — единичная нормаль к площадке ds .

Приняв допущение о симметричной форме зерен порошка, изотропности магнитных свойств материала зерна и его высокой магнитной проницаемости, зависимость (2.1) можно привести к виду

$$\vec{F}_{\text{м}} = \frac{1}{\mu_0} V B \overrightarrow{\text{grad}B}, \quad (2.2)$$

где V — объем ферромагнитного зерна, м³; B — магнитная индукция в точке рабочей зоны, где расположено зерно, Т; $\overrightarrow{\text{grad}B}$ — вектор градиента магнитной индукции в той же точке рабочей зоны.

Следовательно, магнитная сила $\vec{F}_{\text{м}}$ определяется размерами зерна, интенсивностью магнитного поля и его неоднородностью в рассматриваемой точке рабочей зоны.

С помощью формулы (2.2) можно проанализировать поведение зерен порошка в рабочей зоне. Магнитное поле рабочей зоны, ограниченное эквидистантными поверхностями полюсного наконечника и обрабатываемой заготовки, неоднородно (рис. 2.3, а). Градиенты магнитной индукции $\overrightarrow{\text{grad}B}$ могут быть разделены на радиальную $\text{grad}B_0$ и тангенциальную $\text{grad}B_t$ составляющие. Если в рабочую зону поместить ферромагнитные частицы, то силами $\vec{F}_{\text{мр}}$ они будут притягиваться к полюсному наконечнику, а силами $\vec{F}_{\text{мт}}$ — втягиваться в рабочую зону. Магнитные силы $\vec{F}_{\text{мр}}$ и $\vec{F}_{\text{мт}}$ позволяют рассмотреть

поведение отдельного зерна при сообщении движения заготовке. Зерно порошка, находящееся в средней части рабочей зоны, будучи прижатым к заготовке, движется вместе с ней под действием силы трения $\vec{F}_{\text{тр}}$. Остановленное силой $\vec{F}_{\text{мт}}$, зерно притягивается к полюсному наконечнику силой $\vec{F}_{\text{мп}}$. Некоторые зерна, помещенные в среднюю часть рабочей зоны, стремятся выстроиться в цепочку вдоль силовых линий магнитного поля (рис. 2.3, б). При вращении заготовки цепочка движется вместе с обрабатываемой поверхностью, пока не достигнет границы рабочей зоны. Затем цепочка начинает совершать колебательные движения под действием сил трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ с обрабатываемой поверхностью и сил $\vec{F}_{\text{мт}}$, стремящихся вернуть цепочку внутрь рабочей зоны. Если увеличить число цепочек, то они проделывают тот же путь, уплотняясь у выхода из рабочей зоны и препятствуя друг другу совершать колебательные движения.

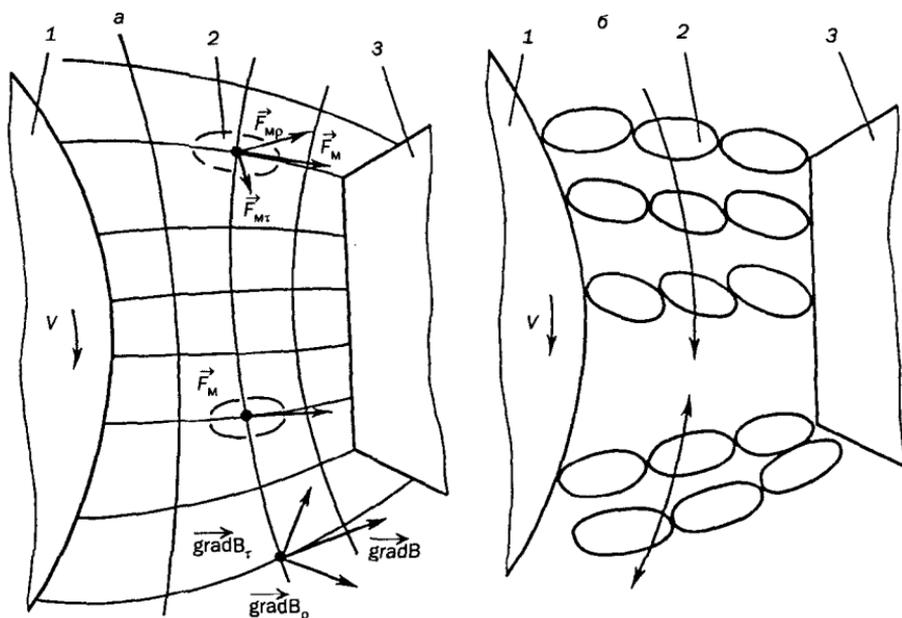


Рис. 2.3. Схема воздействия магнитных сил на зерно ферропорошка (а) и движения цепочки зерен (б) в рабочей зоне при отсутствии импульсов разрядного тока при электромагнитной наплавке (1 — заготовка; 2 — зерно ферропорошка; 3 — полюсный наконечник).

При заполнении рабочей зоны ферромагнитным порошком характер картины поля сохраняется, но изменяется плотность магнитного потока. Если известно распределение магнитных потенциалов в рабочей зоне для случая заполнения ее воздухом, то новые значения магнитных потенциалов при заполнении рабочей зоны порошком можно оценить и определить количественно с помощью коэффициентов β_1 и β_2 . Значения магнитных потенциалов внутри рабочей зоны должны быть увеличены умножением на коэффициент $\beta_1 > 1$, а на участках потоков рассеяния — уменьшены делением на $\beta_2 < 1$:

$$\beta_1 = \mu_n(G_1 + G_2)/(\mu_n G_1 + G_2);$$

$$\beta_2 = (G_1 + G_2)/(\mu_n G_1 + G_2),$$

где μ_n — относительная магнитная проницаемость порошка; G_1 и G_2 — соответственно магнитные проводимости рабочего зазора и участков рассеивания при заполнении воздухом.

Если зерно порошка имеет удлиненную форму, например, эллипсоида, то на него действует момент магнитных сил M_m , который может быть вычислен по формуле

$$M_m = pS^*ak \sin\theta,$$

где $p = B^2/2\mu_0$ — магнитное давление на единичную площадку поверхности зерна; S^* — площадь среднего поперечного сечения эллипсоида; a — длина его наибольшей оси; θ — угол между направлениями наибольшей оси эллипсоида и силовых линий внешнего магнитного поля; k — коэффициент.

Если материал зерна имеет высокие магнитные свойства ($\mu_m \gg 1$), то

$$k = 2(N - \frac{1}{3})/[\lambda(N - 1)],$$

где λ — отношение полуосей эллипсоида, а значение N для вытянутого эллипсоида ($\lambda > 1$) определяется из зависимости

$$N = \lambda^2 \left[1 - \left(1/\sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \operatorname{arctg} \sqrt{\lambda^2 - 1} \right] / (\lambda^2 - 1).$$

Каждое зерно вытянутой формы под действием момента магнитных сил M_m стремится развернуться вдоль силовых линий поля, однако окружающая

порошковая среда и силы трения с движущейся поверхностью заготовки препятствуют переориентации зерна. При этом со стороны вытянутого зерна на порошковую среду и поверхность заготовки действует дополнительная магнитная сила

$$F_{m1} = (M_m / a) \sin\theta.$$

2.2.2. Поля напряжений в порошковой среде. Силы взаимодействия в контакте зерен порошка с обрабатываемой поверхностью определяются не только силами, действующими непосредственно на контактирующее зерно, но и воздействием на него окружающей порошковой среды. Сложность расчетов усугубляется тем, что сами зерна внутри рабочей зоны имеют разную форму и размеры, поэтому было принято допущение, что рабочая зона заполнена однородной по плотности и магнитным свойствам порошковой средой. С учетом сделанного допущения вместо сил \vec{F}_i , действующих на отдельные зерна, оперировали удельными силами \vec{F}_j , действующими на малые единичные объемы порошковой среды.

$$\vec{F}_j = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i / \Delta V,$$

где \vec{F}_i — силы, действующие на n зерен, перемещающихся в объеме ΔV .

На границе области, занятой порошковой средой, и на выделяемых площадках внутри среды нормальные и тангенциальные напряжения будут определяться соответственно следующими зависимостями:

$$\sigma_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{in} / \Delta S, \quad \sigma_\tau = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{i\tau} / \Delta S.$$

Здесь \vec{F}_{in} и $\vec{F}_{i\tau}$ — нормальные и тангенциальные силы, действующие на площадку ΔS со стороны i -го зерна, размещающегося на этой площадке.

На боковых границах порошковой среды действуют магнитные давления P_{mz} , направленные внутрь порошковой среды. Внутри среды действуют удельные магнитные силы $\vec{F}_{\mu m}$, которые целесообразно рассматривать как геометрическую сумму координатных составляющих $\vec{F}_{\mu y}$ и $\vec{F}_{\mu z}$ (рис. 2.4, а).

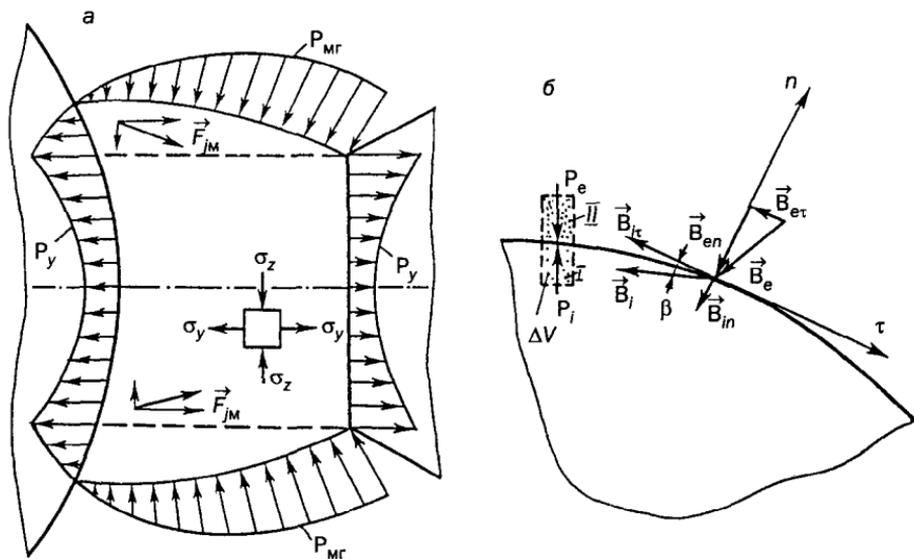


Рис. 2.4. Схема воздействия магнитных сил и давления в рабочей зоне (а) и на поверхности раздела сред ферропорошок—воздух (б) при отсутствии рабочих движений при электромагнитной наплавке.

Под действием давлений $P_{мг}$ и удельных магнитных сил \vec{F}_{jmz} каждый элементарный объем среды испытывает сжатие напряжениями σ_z . По законам механики зернистых сред в плоскости, перпендикулярной к направлению действия σ_z , возникают напряжения бокового распора σ_y , равные

$$\sigma_y = \sigma_z \xi = \sigma_z \mu / (1 - \mu),$$

где ξ — коэффициент, характеризующий условия бокового давления; μ — коэффициент Пуассона для данной порошковой среды.

Напряжения σ_y передаются к поверхностям полюсного наконечника, заготовки и совместно с силами \vec{F}_{jmy} создают на этих плоскостях давления P_y .

Наличие напряжений σ_y объясняет силовой контакт частиц порошка с заготовкой, когда все магнитные силы \vec{F}_{jmy} направлены от заготовки к полюсному наконечнику.

Удельные магнитные силы \vec{F}_{jm} могут быть определены, если известны закономерности распределения магнитного поля, по формуле

$$\vec{F}_{jm} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_{mi}}{\Delta V} = \frac{1}{\mu_n} \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\Delta V} \vec{B} \text{grad} B = \frac{\varepsilon}{\mu_n} B \frac{\partial B}{\partial n},$$

где μ_n — магнитная проницаемость порошковой среды при величине индукции B ; n — направление градиента магнитной индукции в данной точке пространства; ε — объемное содержание ферромагнитного материала в единичном объеме порошковой среды

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n V_i / \Delta V = \gamma_n / \gamma_m,$$

где γ_n и γ_m — плотность материала порошка в порошковом и монолитном состояниях соответственно.

Тогда координатные составляющие удельной магнитной силы будут соответственно

$$\vec{F}_{jmy} = \frac{\varepsilon}{\mu_n} B \frac{\partial \vec{B}}{\partial \vec{Y}}; \quad \vec{F}_{jnz} = \frac{\varepsilon}{\mu_n} B \frac{\partial \vec{B}}{\partial \vec{Z}}.$$

Для расчета магнитных давлений P_{mz} на боковых границах рабочего зазора можно воспользоваться следующим приемом. Если малый объем порошка ΔV перенести через границу раздела сред по нормали к этой границе из положения I внутри порошковой среды в положение II вне этой области, то магнитная энергия этого малого объема изменится, не изменив существенно распределение магнитного поля в ближайшей зоне (рис. 2.4, б). В этом случае удельная магнитная энергия в объеме ΔV может быть определена по формуле

$$W_j = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\Delta V} \frac{B^2}{2\mu_0} = -\varepsilon \frac{B^2}{2\mu_0}.$$

Разность удельных магнитных энергий в начальном и конечном положениях в первом приближении равна магнитному давлению на поверхности границы в этой точке

$$P_{mz} = W_{j2} + W_{j1} = \frac{\varepsilon}{2\mu_0} (B_i^2 - B_e^2), \quad (2.3)$$

где B_i и B_e — значения магнитной индукции в данной точке и на границе внутри среды соответственно.

Проекции векторов магнитной индукции и напряженности поля на границе раздела сред связаны соотношением $B^2 = B_n^2 + B_\tau^2$.

С учетом этого зависимость (2.3) можно привести к виду

$$P_{mz} = \frac{\varepsilon}{2\mu_0} (1 - \mu_0^2 / \mu_n^2) B_{it}^2 = \frac{\varepsilon}{2\mu_0} B_i^2 [1 - (1/\mu_n)^2] \cos^2 \beta.$$

Максимальное значение P_{mz} принимает при $\beta = 0$, когда векторы магнитной индукции в каждой точке границы раздела сред совпадают с ее направлением, т. е. наиболее вероятным расположением границы раздела сред в статике является ее совмещение с направлением силовых линий магнитного поля, так как это обеспечивает наиболее надежное удерживание зерен порошка на поверхности раздела сред.

При вращении заготовки удельные силы трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ в контакте порошка с обрабатываемой поверхностью совместно с давлением P_{mz} смещают порошковую среду в направлении движения. Выбрасыванию порошка из рабочей зоны препятствуют удельные магнитные силы $\vec{F}_{\text{ймз}}$, направленные навстречу движению; силы трения $\vec{F}_{\text{тр.п.}}$ в контакте порошка с полюсным наконечником; давление P_{mz} .

Силы трения порошка с заготовкой перемещают порошок к границе зоны и создают в рабочем зазоре собственное поле напряжений, которое, суммируясь с полем напряжений от действия P_{mz} и $\vec{F}_{\text{гр}}$, создает увеличение давления P_y на поверхностях полюсного наконечника и заготовки. Нормальную составляющую силы давления P_y для каждого зерна, находящегося в контакте с заготовкой, можно вычислить по формуле

$$P_y(k) = P_y(k) \Delta S / N = P_y(k) b^2,$$

где $P_y(k)$ — среднее значение силы P_y в пределах малой площадки ΔS с центром в точке $z = k$; $P_y(k)$ — давление на заготовку в точке $z = k$; $N = \Delta S / b^2$ — число зерен порошка, размещающихся на площадке ΔS ; b — размер малой оси эллипсоида.

Тангенциальные составляющие силы давления в каждой точке линии контакта порошка с обрабатываемой поверхностью, если при движении заготовки соблюдено условие равновесия всех сил в направлении оси z , определяются из зависимости

$$P_z(k) = F_{\text{гпр}}(k)\Delta S/N = F_{\text{гпр}}(k)b^2.$$

Следовательно, в результате электромагнитных процессов зерна порошка под действием составляющих силы давления P_y и P_z удерживаются на поверхности заготовки. Это свидетельствует о том, что при формировании электромагнитного покрытия не требуется дополнительных механических воздействий. Однако для повышения параметров качества микрогеометрии и макрорельефа покрытия небольшой толщины, полученного ЭМН, допускается дополнительная механическая обработка — поверхностное пластическое деформирование покрытия.

2.3. Управление процессом возбуждения электрического разряда при электромагнитной наплавке

Возбуждение электрического разряда и соблюдение стабильности протекания процесса — важные технологические операции электромагнитной наплавки, оказывающие влияние на производительность, качество покрытия, расход порошка и электроэнергии.

Процесс ЭМН для системы с постоянной подачей порошка в рабочую зону можно рассматривать в несколько стадий: формирование «щетки» порошка на рабочем торце полюсного наконечника, осуществление процесса замыкания цепи первой цепочкой-электродом, нагрев цепочки-электрода протекающим током, возбуждение горения и погасание электрической дуги с замыканием цепи последующими цепочками-электродами (рис. 1.15).

Признаком установления стабильного процесса ЭМН является групповое перекрываемое горение цепочек-электродов в рабочей зоне.

Установлено, что образовавшиеся при электрическом разряде объемы жидкого металла выбрасываются из зоны расплавления. Место зарождения и развития электрического разряда с учетом того, что цепочка-электрод состоит из отдельных зерен, зависит от многих факторов. Определение точки, в которой

происходит дуговой разряд в цепочке, и управление его местоположением важно для повышения производительности процесса, срока службы полюсного наконечника, снижения расхода ферропорошка и энергетических затрат.

Согласно теории термической ионизации возбуждение и развитие электрического дугового разряда происходит в месте выделения наибольшего количества теплоты в системе «токоподводящий наконечник — электрод — деталь».

Для определения места возбуждения электрического разряда в цепочке-электроде и факторов, позволяющих управлять этим процессом, необходимо установить распределение температуры по длине токопроводящей цепочки-электрода в момент, предшествующий зарождению и развитию дугового разряда.

Из теории процессов сварки известно, что соприкосновение электрода с основным металлом характеризуется резким падением напряжения и нарастанием силы тока короткого замыкания. Цепочка-электрод на участке между заготовкой и токоподводящим наконечником нагревается протекающим током согласно закону Джоуля-Ленца. В месте выделения наибольшего количества теплоты происходит перегрев цепочки-электрода и возникновение дугового разряда.

Известно, что при ЭМН электрод состоит из N дискретных частиц порошка, между которыми существуют дополнительные контактные сопротивления $R_{12}, R_{23}, \dots, R_{(N)N}$. Для рассмотрения нагрева цепочки-электрода принимаем ряд допущений: порошок состоит из одинаковых по форме зерен — эллипсоидов вращения с размерами большой и малой осей a и b ; в окрестности точки А (рис. 2.5) — контакта первого зерна с полюсным наконечником часть выделяющейся энергии, которая характеризуется коэффициентом распределения энергии $0 < k < 1$, поступает к первому зерну, а остальная — расходуется на разогрев полюсного наконечника. Так как время импульса составляет 0,01—0,15 с, то потерями энергии на конвекцию и излучение пренебрегаем.

Для полюсного наконечника нагреваемая область вокруг точки А ограничивается цилиндрическим объемом металла длиной, равной a , и сечением

ΔS , равным наибольшей поперечной площади зерна. На участке AA_1 (рис.2.5) температурная зависимость запишется уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial \lambda_{nn}}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_{nn} \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / (C_{nn} \rho_{nn})$$

с граничными условиями

$$\theta(-a, t) = \theta_c ;$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=-0} - \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=+0} = \frac{k I^2 R_{nn1}(t)}{\lambda_{nn} \cdot \Delta S},$$

где λ_{nn} — теплопроводность материала полюсного наконечника; C_{nn} — удельная теплоемкость материала наконечника; ρ_{nn} — удельное электрическое сопротивление материала наконечника; θ_c — температура окружающей среды; k — коэффициент распределения энергии; $R_{nn1}(t)$ — контактное сопротивление в точке A .

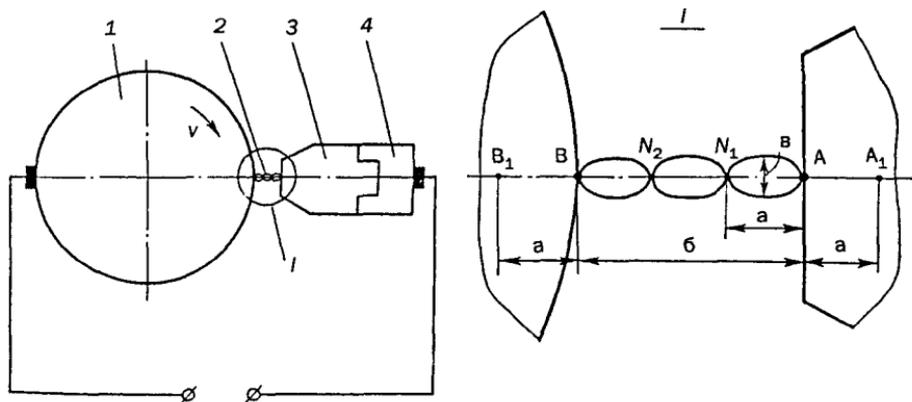


Рис. 2.5. Расчетная схема нагрева цепочки-электрода
(1 — заготовка; 2 — зерно ферропорошка;
3 — полюсный наконечник; 4 — сердечник электромагнита).

Процесс нагрева цепочки-электрода можно описать уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial (\lambda \partial I / \partial x)}{\partial x} + \frac{I^2 R_1(t)}{\Delta S} \right] / (C_p),$$

где λ — теплопроводность материала порошка; $R_1(t)$ — сопротивление материала первого зерна; C — удельная теплоемкость материала порошка; p — удельное электрическое сопротивление.

Граничное условие для уравнения в точке контакта первого зерна N_1 (рис. 2.5) определяется зависимостью

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=a-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=a+0} = \frac{I^2 R_{12}(t)}{\lambda \Delta S},$$

где $R_{12}(t)$ — контактное сопротивление в точке N_1 .

Процесс нагрева электрода на участке i -го зерна описывается уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial(\lambda \partial I / \partial x)}{\partial x} + \frac{I^2 R_i(t)}{\Delta S} \right] / Cp$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=(i-1)a-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=(i-1)a+0} = \frac{I^2 R_{(i-1)i}(t)}{\lambda \Delta S};$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=ia-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=ia+0} = \frac{I^2 R_{i(i+1)}(t)}{\lambda \Delta S}.$$

Здесь $R_i(t)$ — сопротивление материала i -го зерна; $R_{(i-1)i}(t)$ — контактное сопротивление в точке N_{i-1} ; $R_{i(i+1)}$ — контактное сопротивление в точке N_i .

Для зерна, находящегося в контакте с обрабатываемой поверхностью в точке В (рис. 2.5), граничные условия будут

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=(n-1)a-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=(n-1)a+0} = \frac{I^2 R_{n(n-1)}(t)}{\lambda \Delta S};$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=na-0} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=na+0} = \frac{I^2 R_{nu}(t)}{\lambda \Delta S},$$

где R_{nu} — контактное сопротивление в точке В.

В окрестностях точки В будет происходить разогрев заготовки, аналогичный разогреву полюсного наконечника в точке А. В этом случае изменение температуры участка $ВВ_1$ можно определить из уравнения

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left[\frac{\partial \lambda_n}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_n \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / C_n p_n,$$

где λ_n — теплопроводность материала заготовки; C_n — удельная теплоемкость материала заготовки; p_n — удельное электрическое сопротивление материала заготовки с граничными условиями в точке В

$$\theta[(n+1)a, t] = \theta_c.$$

Следовательно, модель процесса нагрева цепочки-электрода можно представить следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial \lambda_{mn}}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_{mn} \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / (C_{mn} p_{mn}), \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial(\lambda \partial I / \partial x)}{\partial x} + \frac{I^2 R_1(t)}{\Delta S} \right] / (Cp); \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial(\lambda \partial I / \partial x)}{\partial x} + \frac{I^2 R_2(t)}{\Delta S} \right] / (Cp); \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial(\lambda \partial I / \partial x)}{\partial x} + \frac{I^2 R_i(t)}{\Delta S} \right] / (Cp); \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial(\lambda \partial I / \partial x)}{\partial x} + \frac{I^2 R_u(t)}{\Delta S} \right] / (Cp); \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \left[\frac{\partial \lambda_u}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda_u \partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] / (C_u p_u). \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Распределение температуры по длине цепочки-электрода можно исследовать в зависимости от силы проходящего по ней тока и коэффициента распределения энергии в момент времени, предшествующий дуговому разряду. Для определения контактных сопротивлений между зернами порошка используется зависимость

$$R_k = r_k / P^z,$$

где r_k — контактное сопротивление, Ом; P — давление в контакте, МПа; z — показатель степени (для стали и сплавов на основе железа $z = 0,75$).

Контактное сопротивление складывается из сопротивления стягивания линий тока, проходящего через контактную площадку, и последовательного с ним сопротивления окисных пленок, присутствующих на поверхности зерен порошка

$$r_k = r_1 + r_2 + r_f = \rho_1/4R + \rho_2/4R + \rho_f s/R^2,$$

где r_1, r_2 — сопротивление зерен порошка в зоне контакта; r_f — сопротивление окисной пленки; ρ_1, ρ_2 — удельное сопротивление контактирующих металлов; ρ_f — удельное сопротивление окисной пленки; s — суммарная толщина пленки; R — радиус зоны контакта. В условиях ЭМН в контакте между зернами действуют небольшие сжимающие усилия, их величина не превышает 0,3 Мпа. Окисные пленки не могут быть разрушены механическим путем, поэтому они оказывают решающее влияние на контактное сопротивление, а сопротивлением зерен можно пренебречь.

С учетом вышеизложенного величина контактного сопротивления определится по формуле

$$R_k = \rho_f s / (\pi R^2 \cdot P^2),$$

где P — магнитное давление между частицами ферропорошка, которое определяется зависимостью

$$P = \frac{\varepsilon}{2\mu_0} B^2 \left[1 - \left(\frac{1}{\mu_n} \right)^2 \right],$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 2\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

При расчете по модели (2.4) нагрева цепочки-электрода с учетом контактных сопротивлений между зернами порошка, сжимаемыми силами магнитной индукции, использовался пакет прикладных программ для реализации численных методов интегрирования дифференциальных уравнений. Например, при расчетах примем размеры зерен равными $a = 0,4$ мм; $b = 0,2$ мм; площадь контакта зерна $S = 0,008$ мм. В качестве материала наплавляемого порошка использовался порошок ПЖРВ2, для которого $P = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho_f = 10^3$ Ом·м и $\Delta S = 10^{-8}$. Результаты расчета представлены на рис. 2.6 и 2.7 в виде графиков.

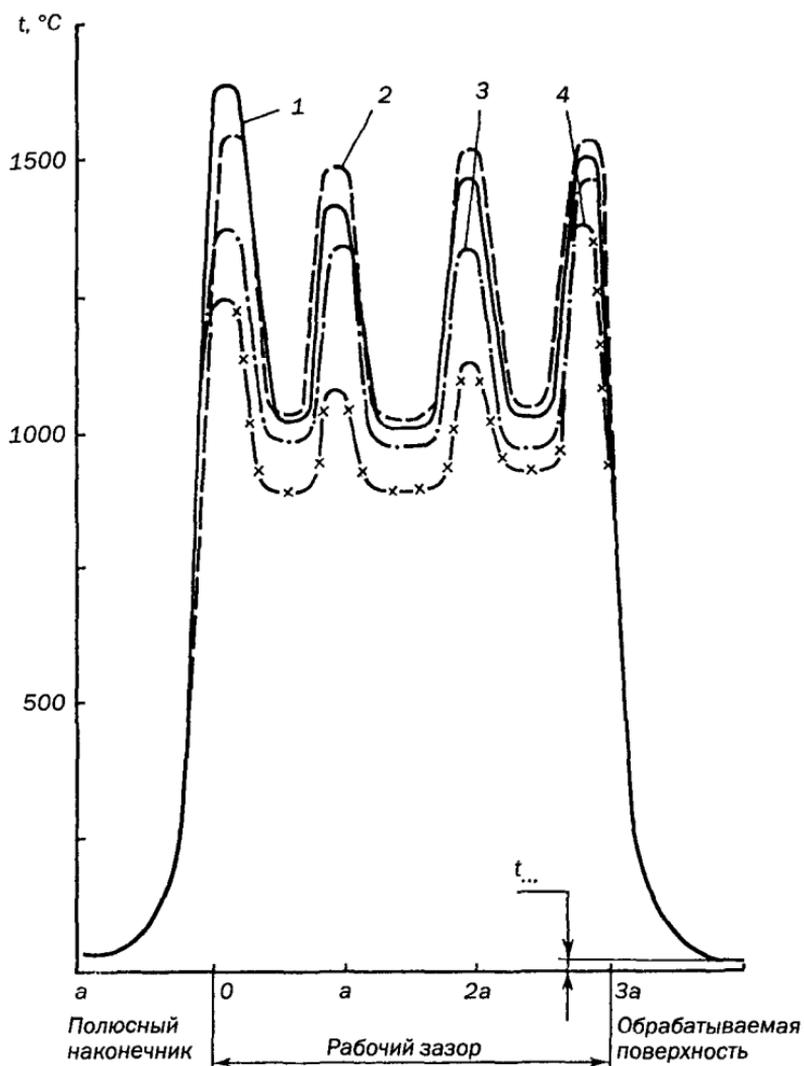


Рис. 2.6. Распределение температуры t по длине цепочки-электрода при различных значениях коэффициента передачи энергии ($I = 100 \text{ A}$; $B = 1,0 \text{ Тл}$; $\tau = 10^{-3} \text{ с}$):
 1) $K = 0,8$; 2) $K = 0,7$; 3) $K = 0,6$; 4) $K = 0,5$.

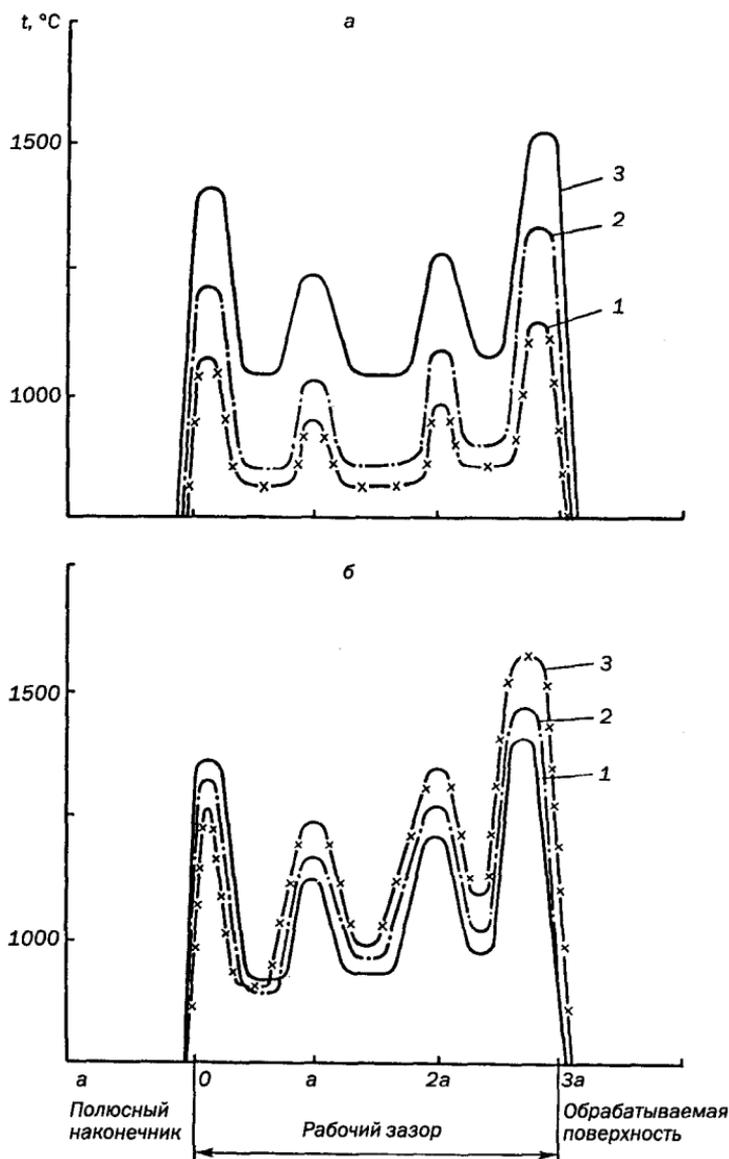


Рис. 2.7. Распределение температуры t по длине цепочки-электрода при различных значениях силы разрядного тока (а) и магнитной индукции в рабочей зоне (б) ($K = 0,65$; $\tau = 10^{-3}$ с): 1) $I = 100$ А; $B = 0,6$ Т; 2) $I = 120$ А; $B = 0,8$ Т; 3) $I = 140$ А; $B = 1,0$ Т

Анализ распределения температуры по длине цепочки-электрода (рис. 2.6 и 2.7) показывает, что при коротком замыкании происходит ее неравномерный нагрев. При распределении температуры наблюдается ряд температурных максимумов: у полюсного наконечника, в местах контакта зерен порошка, у поверхности обрабатываемой заготовки. Возбуждение и развитие электрической дуги объясняется тем, что благодаря высокой плотности тока температура контакта сильно возрастает, металл зерен расплавляется и частично испаряется. Образуется промежуток, заполненный парами металла, потенциал которых ниже потенциала ионизации воздуха. Ввиду малого расстояния между электродами и высокой степени ионизации развивается дуговой разряд. Следовательно, место возникновения и протекания электрического разряда определяется расположением температурного максимума.

Анализ изменения температуры по длине цепочки-электрода в зависимости от условий ЭМН показывает, что расположение температурного максимума зависит в основном от перераспределения теплоты в контакте полюсный наконечник — порошок. При коэффициенте распределения энергии $k > 0,7$ температурный пик находится в точке А (рис. 2.5) и электрический разряд развивается у поверхности полюсного наконечника, при этом процесс наплавки на обрабатываемую поверхность не происходит. Когда $k < 0,7$, место избирательного возникновения дугового разряда определяется значением контактных сопротивлений между зернами порошка.

Экспериментальная проверка полученной математической модели нагрева цепочки-электрода затруднена тем, что истинную силу тока и контактные сопротивления определить с достаточной степенью точности не представляется возможным. Однако проведенные теоретические исследования позволяют выявить факторы, с помощью которых можно условно устанавливать место возбуждения дугового разряда в цепочке-электроде.

Анализ распределения температуры по длине цепочки-электрода, проведенный по рассмотренной модели (2.4), позволяет утверждать, что при обеспечении условий для существования дугового разряда у поверхности заготовки там происходит наибольшее тепловыделение, формируется температурный максимум, равный температуре плавления зерен порошка, и осуществляется процесс ЭМН.

Следовательно, уменьшение количества теплоты, выделяющейся у полюсного наконечника, и создание условий для возникновения и развития дугового разряда у поверхности обрабатываемой заготовки — путь обеспечения устойчивости, повышения производительности и качества ЭМН.

В табл. 2.1 представлены результаты экспериментов, подтверждающих вышеизложенные положения теоретического представления закономерностей протекания процесса ЭМН. На партию образцов из стали 45 наплавляли покрытия, охлаждая полюсный наконечник, на другую — без охлаждения. Специально разработанная конструкция полюсного наконечника из стали 10 охлаждалась проточной водой. Наплавка покрытия из порошка ПЖРВ2 производилась при различных режимах процесса ЭМН. Установлено, что место возникновения и протекания электрического разряда определяется расположением температурного максимума, равного температуре плавления зерен порошка. Расположение температурного максимума зависит от перераспределения теплоты в системе «полюсный наконечник — цепочка-электрод — обрабатываемая заготовка». При значениях коэффициента, характеризующего распределение энергии по длине цепочки-электрода, $k > 0,7$ температурный максимум находится у поверхности полюсного наконечника, при $k < 0,7$ — расположен у обрабатываемой поверхности. В последнем случае наблюдается устойчивый перенос расплава на поверхность изделия.

Табл. 2.1.
*Электромагнитная наплавка порошка ПЖРВ2 с охлаждением (ОН)
и без охлаждения (БОН) полюсного наконечника.*

№ п/п	Режим ЭМН			Увеличение массы образца, мг		Уменьшение массы полюсного наконечника, мг	
	$i, \text{A/mm}^2$	B, T	$g, \text{г/(с·мм}^2\text{)}$	ОН	БОН	ОН	БОН
1	1,2	0,6	2,0	152	114	4	8
2	1,2	0,6	2,4	162	123	5	9
3	1,4	0,7	2,8	168	132	6	12
4	1,4	0,7	3,2	172	139	6	12
5	1,6	0,8	3,6	183	144	7	14
6	1,6	0,8	4,0	186	148	9	15
7	1,8	0,9	4,0	182	152	12	15
8	1,8	0,9	3,6	178	155	12	17
9	2,0	1,0	3,2	174	157	10	22
10	2,0	1,0	2,8	172	158	11	23

Анализ распределения температуры по длине цепочки-электрода позволил определить путь обеспечения устойчивого процесса ЭМН: уменьшение количества теплоты, выделяемой у поверхности полюсного наконечника, и создание условий для возникновения и развития дугового разряда у обрабатываемой поверхности заготовки.

2.4. Модели деформационных процессов наплавленных поверхностей

В процессе поверхностного пластического деформирования пористые и порошковые материалы испытывают необратимую объемную деформацию, что принципиально отличает их от монолитных, которые принято считать несжимаемыми. По отношению к таким материалам механика сплошной среды может применяться для изучения процессов, происходящих как в микрообъемах, так и на макроуровне. Известно, что механика сплошной среды основана на предположении, что изучаемые объекты равномерно распределены в занимаемом ими объеме, но применение ее на микроуровне возможно при условии, если характерные размеры микрообъемов намного больше молекулярно-кинетических размеров вещества. Применение же ее на макроуровне основано на допущении, что рассматриваемое тело может быть разбито на элементарные макрообъемы, характерные размеры которых, с одной стороны, намного меньше размеров тела, а с другой — намного больше размеров структурных элементов. При этом предполагается, что изменение параметров внутри макроэлементов незначительно. Макрохарактеристики, такие как плотность, напряжения, деформации и другие, полученные согласно этим предположениям, будут с достаточной точностью совпадать с усредненными по объему характеристиками.

При решении многих практических задач учитывается малая, но конечная пластическая неоднородность материала. При этом решение задачи возможно при условии, что радиус тела качения R значительно превышает ширину пластического контакта d . Движение деформирующего элемента радиусом R происходит под действием приложенных к нему усилий P_z , P_y и момента M , которые определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 P_z &= kd \left[\cos 2\eta + \delta/2(1 + \pi/2 + 2\eta + \sin 2\eta) - \delta\sqrt{2}/3(\operatorname{cosec}\eta + \sqrt{2}) \right]; \\
 P_y &= kd \left[1 + \pi/2 + 2\eta + \sin 2\eta - \delta/2(\cos 2\eta + \sqrt{2} \operatorname{cosec}\eta + 2) \right]; \\
 M &= kR^2 [\sigma \cos 2\eta],
 \end{aligned}$$

где η — угол наклона линий скольжения к контактной поверхности; $\delta = d/R$ — малый параметр ($\sigma \ll 1$); k — пластическая константа материала

$$k = \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{zy}^2},$$

где σ_z , σ_y и τ_{zy} — нормальные и касательные напряжения.

Однако при ЭМН, в отличие от других методов нанесения покрытий, идеально-пластичным можно представлять только тонкий слой наплавки, а саму основу нужно рассматривать как жестко-пластичный или упруго-пластичный материал.

Для определения малых упруго-пластичных деформаций при активном нагружении используется метод последовательных приближений, названный **методом упругих решений**. Суть его заключается в рассмотрении последовательности линейных задач теории упругости, решения которых с увеличением порядкового номера сходятся к решению задачи теории пластичности.

Известны различные модификации метода упругих решений: в форме дополнительных нагрузок, в форме переменных параметров упругости и др.

Воспользуемся, например, формой переменных параметров упругости, обеспечивающей наиболее быструю сходимость итерационного процесса, построенного по методу упругих решений. В качестве начального приближения примем решение для упругого полупространства с коэффициентом χ , используемым в подавляющем числе критериев универсальных теорий прочности: Кулона-Мора, Янга-Бужинского, Писаренко-Лебедева и др. В последующих приближениях также рассматривается упругое полупространство, но на каждом шаге с новым коэффициентом χ_i :

$$\chi = \sigma_0^+ / \sigma_0^- ,$$

где σ_0^+ и σ_0^- — напряжения, предельные для обрабатываемого материала при одноосном растяжении и сжатии соответственно.

Аналогично, рассматривая вводимые формально фиктивные распределения температуры, можно методом упругих решений путем последовательных приближений решать задачи термопластичности.

Рассмотрим начальное приближение, полагая, что $\chi_i = \chi_0$. Находим в деформируемом полупространстве области с эквивалентными напряжениями $\sigma_{\text{экв.}}$, превышающими допустимые при упругих деформациях, и далее рассматриваем эти области при новых значениях коэффициента χ_i . Если таких областей нет или они весьма малы, то при заданных нагрузках пластических деформаций в обрабатываемой поверхности этими деформациями можно пренебречь и считать, что начальное приближение даст решение поставленной задачи.

Проанализируем напряженное состояние методами теории упругости с учетом решений, полученных для полуплоскости. Напряжения в произвольной точке с текущими координатами z, y (рис. 2.8) определяются в полярных координатах из зависимостей:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\frac{2q(\theta)}{\pi} \cos^2 \theta d\theta; \\ \sigma_y &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\frac{2q(\theta)}{\pi} \sin^2 \theta d\theta; \\ \tau_{zy} &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\frac{2q(\theta)}{\pi} \sin \theta \cos \theta d\theta,\end{aligned}$$

где $q(\theta)$ — распределение контактных нагрузок в полярных координатах.

Для перехода к декартовым координатам воспользуемся соотношениями:

$$\begin{aligned}\cos^2 \theta &= z^2 / (z^2 + y^2); & \sin^2 \theta &= y^2 / (z^2 + y^2); & \sin \theta &= zy / (z^2 + y^2); \\ \theta &= \text{arctg } y / z; & d\theta &= zdy / (z^2 + y^2) - ydz / (z^2 + y^2).\end{aligned}$$

Напряженное состояние от сосредоточенной нагрузки P_y (рис. 2.8, а) опишется зависимостями:

$$\sigma_z = A_1 B_1^2 y / C_1^2; \quad \sigma_y = A_1 y^3 / C_1^2; \quad \tau_{zy} = A_1 B_1 y^2 / C_1^2,$$

где $A_1 = -2P_y / \pi$, $B_1 = z - bh$, $C_1 = B_1^2 + y^2$.

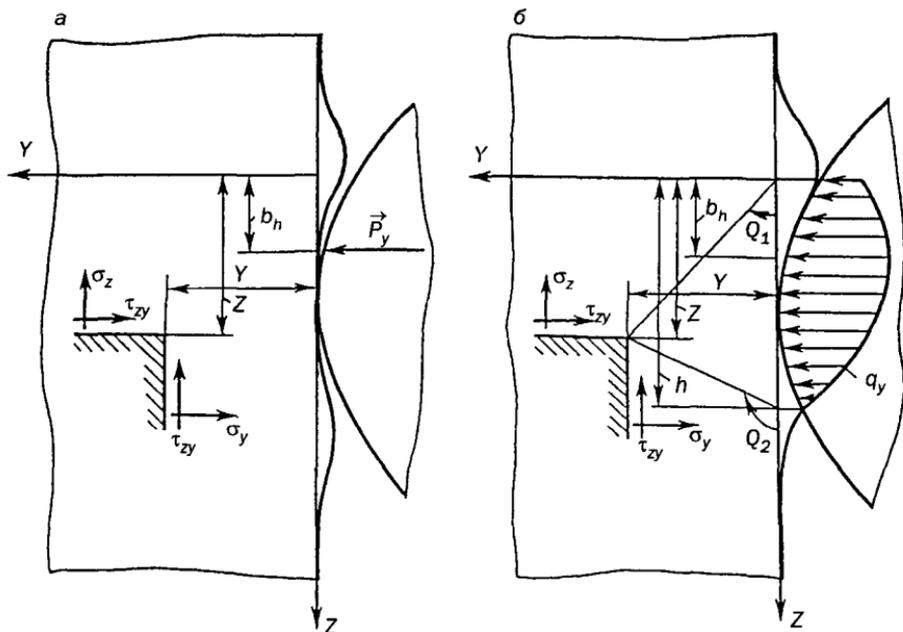


Рис. 2.8. Схема расчета полей напряжений от сосредоточенной силы (а) и распределенной по поверхности нагрузки (б) при электромагнитной наплавке.

При значительных размерах площадки контакта деформирующего элемента и обрабатываемой поверхности необходимо задавать распределение контактных нагрузок по площадке. При качении и вращении деформирующего элемента эту нагрузку в первом приближении можно описать выпуклой квадратной параболой. Напряженное состояние от перпендикулярной нагрузки, описанной квадратной параболой (рис. 2.8, б)

$$q_z = 3P_y (z - bh)^2 - [(1 - b) h^2 / (3b - 2) h^3],$$

представляется зависимостями:

$$\sigma_z = A_2 \left(\frac{S_2 D_2 + 2B_2}{E_2} - \frac{D_2 z + 2B_2}{G_2} + \frac{2C_2 V_2 - U_2 (D_2 - 2)}{y} + \frac{2h}{y^2} \right);$$

$$\sigma_y = A_2 \left(-\frac{S_2 D_2 + 2B_2}{E_2} + \frac{D_2 z + 2B_2}{G_2} - \frac{u_2 (D_2 + 2)}{y} \right);$$

$$\tau_{zy} = A_2 \left(\frac{D_2 y - 2S_2 C_2}{E_2} - \frac{D_2 y - 2C_2 z}{G_2} + \frac{2C_2 U_2 - V_2}{y} \right),$$

где $A_2 = 3P_y (y/h)^3 / [\pi / (2 - 3b)]$; $S_2 = z - h$; $B_2 = z - bh$;
 $C_2 = B_2 / y$; $T_2 = S_2 / y$; $D_2 = C_2^2 - 1 - [(1 - b)/(h/y)]^2$;
 $E_2 = S^2 + y^2$; $G_2 = z^2 + y^2$; $U_2 = \arctg T_2 - \arctg z/y$;
 $V_2 = \ln E_2 - \ln G_2$.

Поля напряжений, рассчитанные согласно полученным соотношениям, позволяют по величинам допустимых напряжений, размерам зон пластических и упругопластических деформаций определить рациональную величину усилий деформирования.

2.5. Поля напряжений при пластическом деформировании наплавленных поверхностей

Для описания напряженного состояния в обрабатываемом материале при ЭМН с ППД используем универсальный критерий Кулона-Мора, эквивалентные напряжения в котором представляются зависимостью

$$\sigma_{\text{экр}} = (1 - \chi)(\sigma_z + \sigma_y) / 2 + (1 + \chi) \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{zy}^2}$$

и сопоставляются с напряжением для данного обрабатываемого материала при одноосном растяжении $\sigma^+ \geq \sigma_{\text{экр}}$.

Коэффициент $\chi = \sigma_0^+ / \sigma_0^-$ изменяется от 0 до 1 с ростом пластичности, которая увеличивается при повышении температуры нагрева обрабатываемого материала. При увеличении значения χ до 1 критерий Кулона-Мора преобразуется в критерий наибольших касательных напряжений

$$\tau_{\text{max}} = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{zy}^2}$$

и сопоставляется с напряжением $\sigma_0^+ / 2 \geq \tau_{\max}$. Критерий наибольших касательных напряжений используется для идеально-пластичного материала.

Поля напряжений в зоне поверхностного пластического деформирования рассчитываются по полученным формулам как для случая точечного контакта (рис. 2.9, а), так и для случая квадратичного распределения нагрузки по линии контакта (рис. 2.9, б).

Для покрытия и основы с отличающимися физико-механическими свойствами при построении полей эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ и максимальных касательных напряжений τ_{\max} используются различные значения коэффициента $\chi = \sigma_0^+ / \sigma_0^-$ от 0,1 до 1,0. Ввиду малости зоны идеальной пластичности при ЭМН с ППД, равной небольшой толщине покрытия, расчеты ограничатся начальным приближением.

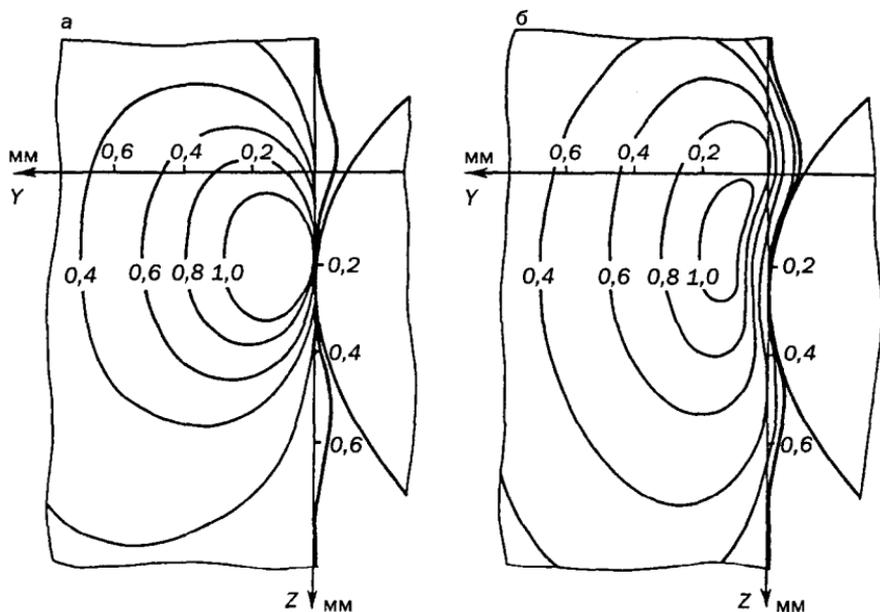


Рис. 2.9. Схема распределения полей напряжений при деформировании наплавленных поверхностей а) для точечного контакта ($\chi = 1,0$); б) для площадки контакта ($\chi = 0,3$).

Формы и размеры зон как наибольших эквивалентных напряжений, максимальных касательных напряжений, так и структурных изменений в результате деформации определяются площадью контактного взаимодействия и физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов. Следовательно, изменением площади контакта и физико-механических свойств обрабатываемых материалов путем увеличения усилия деформирования и интенсивности теплового воздействия можно управлять деформационными и термдеформационными процессами для повышения параметров качества обрабатываемой поверхности, причем глубина упрочнения в результате этих процессов может быть как больше, так и меньше толщины покрытия, полученного электромагнитной наплавкой.

По приведенной выше методике можно определить рациональное усилие деформирования поверхности при ЭМН с ППД.

Для этого вначале определяем условия прочности, т. е. рассчитываем силу, при которой произойдет разрушение покрытия в процессе его поверхностного пластического деформирования

$$P_y = \frac{\pi(2-3b)\sigma_{\text{экв}}}{3(y/h)^3 \left[(1-\chi)(\sigma'_z + \sigma'_y)/2 + (1+\chi)\sqrt{(\sigma'_z - \sigma'_y)^2/4 + \tau_{yz}^2} \right]},$$

при $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_0^+$, где

$$\sigma'_z = \frac{SD + 2B}{E} - \frac{D_z - 2B}{G} + \frac{2CV - U(D-2)}{y} + \frac{2h}{y^2};$$

$$\sigma'_y = \frac{SD + 2B}{E} + \frac{D_z + 2B}{G} - \frac{U(D+2)}{y};$$

$$\tau'_{yz} = \frac{Dy - 2SC}{E} - \frac{Dy - 2Cz}{G} - \frac{2CU - V}{y},$$

в которых

$$S = z - h;$$

$$B = z - bh; \quad C = B/y;$$

$$T = S/y;$$

$$D = C2 - 1 - [(1-b)h/y]2;$$

$$E = S2 + y2;$$

$$G = z2 + y2;$$

$$U = \arctg T - \arctg z/y;$$

$$V = \ln E - \ln G.$$

При этом в качестве опасной точки для расчета целесообразно выбрать точку, расположенную под максимумом эпюры контактных нагрузок на границе покрытие—основа с координатами $y = bh, z = a$.

Затем рассматриваем возможность упрочнения поверхности пластическим деформированием, т. е. находим силу, при которой соблюдается условие пластичности на определенной глубине

$$P_{y_2} = \frac{\pi(2-3b)\tau_{\max}}{3(y/h)^3 \sqrt{(\sigma'_z - \sigma'_y)^2 / 4 + \tau_{yz}'^2}},$$

при $\tau_{\max} = \sigma_0^+ / 2$.

Для упрочнения покрытия деформированием после ЭМН лучше всего выбрать точку с координатами $y = bh, z > a$, в которой выполняется условие пластичности.

Полученные значения P_{y_1} и P_{y_2} сравниваем; если $P_{y_1} > P_{y_2}$, то принимаем P_{y_2} , обеспечивая тем самым требуемое упрочнение; если $P_{y_1} < P_{y_2}$, то принимаем P_{y_1} , не допуская тем самым разрушения покрытия, а при $z = a$ — отслаивания наплавленного слоя.

Определим рациональные усилия деформирования по имеющимся замерам контактной площадки $h = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $y = 2/7 h = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м, максимальной толщине наплавленного слоя $z = a = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м и допустимым параметрам напряжений $\sigma_{\text{экр}} = 50$ кН/м, $\tau_{\max} = \sigma_{\text{экр}}/2 = 25$ кН/м: $P_{y_1} = \sigma_{\text{экр}}/68 = 735$ Н; $P_{y_2} = \tau_{\max}/33 = 758$ Н, так как $P_{y_1} < P_{y_2}$ принимаем $P_y = 735$ Н. С учетом запаса на 30—40% получаем $P_y = 1029$ Н и рациональную величину $P_y = 800$ —1000 Н.

Следовательно, усилие при ППД шариком $\varnothing 6,5$ мм покрытия толщиной до 0,5 мм, полученного ЭМН, выбираем в диапазоне 800—1000 Н.

Таким образом, исходя из прогнозируемых параметров упрочнения поверхностного слоя, можно по полученным полям напряжений определить необходимые усилия деформирования при заданной температуре и выбрать рациональный диапазон температур обрабатываемой поверхности.

3. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОКРЫТИЕ—ОСНОВА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

3.1. Температурные поля при электромагнитной наплавке

Температура в системе покрытие—основа — один из основных факторов, влияющих на формирование физико-химических и эксплуатационных свойств покрытий. При ЭМН энергия электрических разрядов не только расплавляет зерна порошка, но и повышает температуру поверхности основы в зоне наплавки. Дополнительный подогрев заготовки улучшает свойства покрытий и адгезионные свойства покрытия и основы. В то же время перегрев системы приводит к уменьшению роста толщины покрытия, адгезии и изменению физико-механических свойств основы и покрытия.

Для расчета полей температур в покрытии и основе при ЭМН принимается реальный дискретный процесс непрерывным. Каждому моменту времени процесса ЭМН будет соответствовать некоторое определенное температурное поле в покрытии и основе. Локальная температура в области развития и горения дугового разряда, где расплавляется порошок и формируется покрытие, может несколько превышать допустимую (критическую) температуру поверхности. Однако, ввиду того, что наплавляемый участок поверхности охлаждается до температуры основы за время не более 10^{-2} с, а толщина покрытия не превышает 500 мкм, термические циклы предыдущего и последующего дуговых разрядов будут оказывать взаимное влияние на температуру поверхности только при большой скорости вращения заготовки. Такая скорость неприемлема для процесса ЭМН из-за возникновения сил инерции, выбрасывающих порошок из рабочей зоны.

Математические модели тепловых процессов ЭМН основаны на уравнениях теплопроводности, учитывающих различие теплофизических свойств покрытия и основы, а также граничные условия, отражающие особенности метода.

В процессе наплавки дуговой разряд возникает и развивается у поверхности заготовки, где формируются максимальные температуры и тепловые

потоки. Поэтому процесс ЭМН в первом приближении можно описать граничными условиями I-го и II-го рода и принять квазистационарным, а тепловой поток, поступающий в покрытие, полностью отнести к разогреву основы. В этом случае определение тепловых полей заготовки при принятых допущениях может быть получено по методу источников с применением принципа наложения, т. е. осуществляется последовательное суммирование уравнения

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} dy dz = \frac{2q_{об} \omega \exp\{-z^2/[4\omega(y_i - y)]\}}{\lambda \sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}}, \quad (3.1)$$

где $q_{об}$ — плотность теплового потока на единицу объема; ω — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности; y_1 — рассматриваемая точка на поверхности заготовки.

Суммирование уравнения (3.1) в соответствии с расчетной схемой (рис.3.1, а) при равномерно распределенной интенсивности тепловыделения (q_T) по всему объему с габаритными размерами h_T и ky_k дает соотношение

$$T_h = \frac{2q_m(2-k)}{h_m \lambda} \int_0^{y_i} \frac{y_k}{y_k - y} dy \int_0^{y_i} \frac{\exp\{-z^2/[4\omega(y_i - y)]\}}{\sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dz + \frac{4q_{mw}}{\lambda} \int_0^{y_i} \frac{(y_k - y) \exp\{-z^2/[4\omega(y_i - y)]\}}{y_k \sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dy. \quad (3.2)$$

Для процесса ЭМН плотность теплового потока определяется зависимостью

$$q_T = \eta_0 V I \tau \upsilon,$$

где η_0 — эффективный КПД электрической дуги; V — напряжение, В; I — сила тока, А; τ — время дугового разряда, с; υ — плотность возникновения дуговых разрядов, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для случая, когда размер зоны тепловыделения мал, т. е. $h_T \rightarrow 0$, к такому варианту можно отнести ЭМН. Тогда представляется возможным использовать соотношение

$$T_h = \frac{4q_m \omega}{\lambda} \int_0^{y_i} \frac{(y_k - y)}{y_k \sqrt{4\pi\omega(y_i - y)}} dy. \quad (3.3)$$

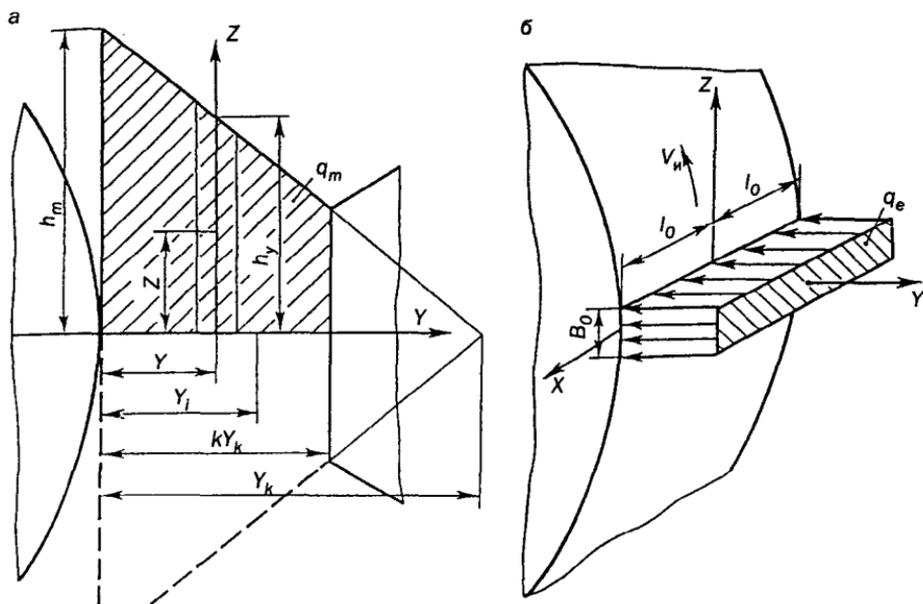


Рис. 3.1. Схема температурных полей от объемного источника тепловыделения (а) и полосового быстродвижущегося источника (б).

Выполненные расчеты (3.2) и (3.3) показывают, что температуры, полученные с учетом объемного источника тепловыделения, ниже температур, рассчитанных (3.3) в среднем на 10%. Причем при относительно малой толщине покрытия, характерной для случая ЭМН, их различие не превышает 6%. Следовательно, движущийся со скоростью V_n источник тепла при ЭМН можно принять полосовым шириной B_0 или даже линейным, распределенным вдоль направления подачи S полюсного наконечника. Протяженность воздействия источника на поверхность будет равна $2l_0$ — ширине — шагу наплавки за один проход (рис. 3.1, б).

Для моделирования такого источника можно в первом приближении рассмотреть зависимость, описывающую процесс распространения тепла от точечного источника быстродвижущегося по полупространству с нетеплопроводной границей.

$$T_i = \frac{q_i}{2\pi\lambda(z-z_n)} \exp\left\{-\frac{V_n[(x-x_n)^2+y^2]}{4\omega(z-z_n)}\right\}, \quad (3.4)$$

где $x_i, 0, z_i$ — координаты точечного источника; q_i — его интенсивность.

Чтобы рассчитать температуру, которая возникает в точке с координатами x, y, z под действием бесконечно большого количества точечных источников, образующих плоский источник $2l_0$, проинтегрируем зависимость (3.4) по x_n и z_n . Интегрирование от $x_n = -l_0$ до $x_n = l_0$ позволяет получить зависимость

$$T_l = \frac{q_l \sqrt{\omega}}{2\lambda \sqrt{\pi V_n}} \int_0^{B_0} \frac{dz_n}{\sqrt{z-z_n}} \exp\left[-\frac{V_n y^2}{4\omega(z-z_n)}\right] \times \\ \times \left\{ \operatorname{erf}\left[(l_0+x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z-z_n)}}\right] + \operatorname{erf}\left[(l_0-x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z-z_n)}}\right] \right\}, \quad (3.5)$$

где $\operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x \exp(-y^2) dy$ — функция интеграла вероятности Гаусса;

q_l — интенсивность источника, распределенного по площадке $2l_0$.

Проинтегрировав зависимость (3.5), можно предположить, что все тепло выделяется в плоскости xOy вдоль оси y , и представив $B_0 = z - z_n$, получим распределение температуры от быстродвижущегося линейного источника

$$T_r = \frac{q_r \sqrt{\omega}}{2\lambda \sqrt{\pi V_n (z-z_n)}} \exp\left[-\frac{V_n y^2}{4\omega(z-z_n)}\right] \times \\ \times \left\{ \operatorname{erf}\left[(l_0+x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z-z_n)}}\right] + \operatorname{erf}\left[(l_0-x) \sqrt{\frac{V_n}{4\omega(z-z_n)}}\right] \right\}, \quad (3.6)$$

где q_r — интенсивность источника, распределенного вдоль отрезка длиной $2l_0$.

Полученные зависимости (3.5) и (3.6) позволяют рассмотреть в первом приближении величину и интенсивность температурных полей в рабочей зоне при ЭМН заготовок больших размеров с достаточным теплоотводом от восстанавливаемых поверхностей.

Если размеры заготовки невелики, а теплоотвод недостаточно интенсивен, то в этом случае можно рассмотреть накопление тепла, ведущее к повышению температуры заготовки в процессе восстановления. Для этого представим, что быстродвижущийся источник перемещается по поверхности сплошного цилиндра по винтовой линии малого шага $2l_0$ и совершает при этом несколько проходов, т. е. несколько оборотов. Тогда температура произвольной точки на поверхности радиусом R будет выражена в виде суммы температур от мгновеннодействующих кольцевых источников, которые можно описать следующим соотношением:

$$T_k = \frac{2q_k}{V_n k R \sqrt{4\pi\omega\tau}} \exp\left[-\frac{x^2}{4\omega\tau} - \frac{2\alpha\tau}{kR}\right] \Phi_0(r, \tau), \quad (3.7)$$

где q_k/V_n — погонная энергия от мгновенного кольцевого источника; k — удельная теплоемкость материала; r — текущий радиус; τ — время, прошедшее с момента выделения теплоты; α — коэффициент теплоотдачи с поверхности; $\Phi_0(r, \tau)$ — функция, описывающая процесс выравнивания теплоты в тонком круглом диске без теплоотдачи при мгновенном выделении теплоты по кольцу на его наружной поверхности.

$$\Phi_0(r, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{\mu_k^2 \omega \tau}{R^2}\right) J_0\left(\frac{\mu_k}{R}\right) / J_0(\mu_k), \quad (3.8)$$

где J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка от действительного аргумента; μ_k — нули функции Бесселя первого рода первого порядка J_1 , т. е. корни уравнения $J_1(\mu_k) = 0$.

Сумму температур от мгновенных кольцевых источников, расположенных на различных расстояниях от рассматриваемой точки и имеющих различное время τ , прошедшее с момента их выделения (т. е. с момента пересечения движущимся источником теплоты осевой плоскости, проходящей через рассматриваемую точку), можно описывать зависимостью

$$T_s = \frac{2q_k}{V_n k R} \sum \Phi_n(r, \tau) \exp\left(-\frac{x_n^2}{2\omega\tau_n} - \frac{2\alpha\tau_n}{kR}\right) / \sqrt{4\pi\omega\tau_n}, \quad (3.9)$$

где x_n — расстояние до рассматриваемой точки при различных проходах; τ_n — время, прошедшее с момента различных проходов; N — число проходов с начала обработки (причем нумерация ведется от последнего прохода).

При большом числе проходов N значение функции выравнивания температур $\Phi_o(r, \tau_n)$ в формуле (3.9) приближается к единице, т. е. $\Phi_o(r, \tau_n) \rightarrow 1$. Это означает, что цилиндр практически полностью прогревается по толщине, тем самым нарушается принятая схема процесса (рис. 3.1, б) и расчет температурных полей по формулам (3.5) — (3.9) нецелесообразен.

В таких случаях определение температур необходимо проводить с учетом накопления теплоты бесконечным цилиндром с постоянным источником, равномерно распределенным по его боковой поверхности. Тогда, при условии, что теплообмен с окружающей средой установился и температуры на боковой поверхности выровнялись, можно рассматривать нестационарную одномерную задачу с граничными условиями первого рода, в которой источник нагрева представляется постоянно действующим и кольцевым. Дифференциальное уравнение теплопроводности в этом случае представится

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \omega \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (3.10)$$

где $\tau > 0$, $0 < r < R$, начальные условия $T(r, 0) = T_o = \text{const}$ и граничные условия $T(r, \tau) = T_c = \text{const}$, $\partial T(0, \tau) / \partial r = 0$, $T(0, \tau) \neq \infty$. Последнее условие означает, что температура в центре кольца на протяжении всего процесса теплообмена должна быть конечной.

Решение уравнения (3.10) имеет вид, аналогичный решению задачи выравнивания температур (3.8):

$$\frac{T_c - T}{T_c - T_o} = \sum_{k=1}^{\infty} 2 \exp\left(-\frac{\mu_k^2 \omega \tau}{R^2}\right) J_o\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) / [\mu_n J_1(\mu_n)], \quad (3.11)$$

где $\mu_n = (2n - 1)\pi/2$.

В случаях, когда восстанавливаются торцевые поверхности и длина цилиндрической поверхности мала, процесс накопления тепла целесообразно рассматривать при установившемся теплообмене для ограниченного цилиндра с постоянными температурами на его боковой и торцевой поверхностях.

Дифференциальное уравнение теплопроводности для нестационарной двумерной задачи тогда будет

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = w \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (3.12)$$

$$\tau > 0, \quad 0 < r < R, \quad -\frac{H}{2} < x < \frac{H}{2},$$

при начальном условии $T(r, x, 0) = T_0 = \text{const}$ и граничных условиях $T(r, \pm H/2, \tau) = T_c = \text{const}$, $T(R, x, \tau) = T_c = \text{const}$.

Решение уравнения (3.12) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{T_c - T}{T_c - T_0} = & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} 4 \exp \left\{ - \left[\mu_m^2 + \left(\mu_n \frac{2R}{H} \right)^2 \right] \frac{\omega \tau}{R^2} \right\} \times \\ & \times \cos \left(\mu_n \frac{2x}{H} \right) J_0 \left(\frac{\mu_n r}{R} \right) / [\mu_n \mu_m J_1(\mu_m)], \end{aligned} \quad (3.13)$$

где μ_m — нули функции Бесселя первого рода нулевого порядка J_0 , т. е. корни уравнения $J_0(\mu_m) = 0$.

Бесконтактное измерение температур в рабочей зоне и последующий расчет температурных полей по формулам (3.5), (3.6), (3.9), (3.11) и (3.12) позволяют в первом приближении описать тепловые процессы при ЭМН.

Для расчета на ЭВМ температур в поверхностном слое заготовок в процессе ЭМН необходимо знать теплофизические свойства материала покрытия и основы. Основа (заготовка) чаще всего является компактным материалом, и его свойства изучены и широко представлены в справочной литературе. Для покрытий выбор значений теплофизических и механических свойств затруднен, так как они в значительной мере зависят от компонентов материала покрытий, метода и условий их нанесения. Исходя из того, что покрытия, полученные ЭМН, имеют монолитное соединение с основой и в основном зависят от химического состава наплавляемого порошка, можно принять значения требуемых теплофизических характеристик как для соответствующих стандартных сплавов, используемых в качестве материала покрытия.

Для примера выполнены расчеты температурных полей при ЭМН порошка $Fe-10\%V$ на заготовки из стали 45. Расчеты производились при следующих условиях: толщина наплавляемого слоя принималась 100, 250, 400 мкм; плотность теплового потока — для следующих значений плотности разрядного тока: 1,33; 1,67; 2,0; 2,67 А/мм²; коэффициент теплоотдачи при ЭМН с использованием рабочей жидкости составлял $\alpha = 560$ Вт/м² К, а при наплавке в воздушной среде — $\alpha = 22$ Вт/м²·К.

Результаты расчетов температурных полей приведены на рис. 3.2—3.6. Как видно (рис. 3.2) повышение температуры поверхности покрытия с увеличением плотности разрядного тока значительно сказывается на времени достижения температурного максимума в системе покрытие—основа. Так при значении $i = 1,33$ А/мм² температура поверхности покрытия увеличивается до $t_{max} = 1730^\circ\text{C}$ за $\tau = 2,51 \cdot 10^{-3}$ с, а при $i = 2,67$ А/мм² — до $t_{max} = 1960^\circ\text{C}$ за $\tau = 7,94 \cdot 10^{-4}$ с, т. е. при увеличении i в два раза τ уменьшается в три раза. Увеличение толщины формируемого покрытия снижает максимальную температуру его поверхности, что можно объяснить увеличением объема нагреваемого порошка. При плотности тока $i = 2,0$ А/мм² и толщине $\delta_1 = 100$ мкм значение $t_{max} = 1989^\circ\text{C}$ достигается за время $\tau = 10^{-3}$ с, а при $\delta_1 = 400$ мкм — $t_{max} = 1715^\circ\text{C}$, $\tau = 3,16 \cdot 10^{-3}$ с (рис. 3.3).

При ЭМН в воздушной среде поверхность покрытия нагревается быстрее $\tau = 1,26 \cdot 10^{-4}$ с, а остывает значительно медленнее, чем при ЭМН в среде рабочей жидкости $\tau = 6,3 \cdot 10^{-4}$ с (рис. 3.4).

В процессе нагрева покрытия и основы при ЭМН (рис. 3.5), выделяемая теплота передается как покрытию, так и основе, причем покрытие прогревается быстрее из-за своей малой толщины. Резко выраженный пик температуры через 0,0001 с после дугового разряда постепенно становится более сглаженным и через 0,0025 с температура покрытия и основы на глубине $\delta = 0,2$ мм практически выравнивается.

При уменьшении температуры покрытия (рис. 3.6) происходит активная передача теплоты из нагретой зоны в окружающую среду и вглубь основы. За время $\tau = 0,0975$ с температура поверхностного слоя заготовки выравнивается и практически не отличается от температуры окружающей среды.

Температурные поля при ЭМН можно рассчитывать по полученным формулам как для линейного источника, быстродвижущегося по границе полупространства, так и для случая накопления тепла бесконечным цилиндром. Однако их целесообразно описывать линейным равномернораспределенным быстродвижущимся по поверхности источником, так как накопление тепла заготовками цилиндрической формы в достаточной мере описывается тепловыми процессами в бесконечном цилиндре с граничными условиями 1-го рода.

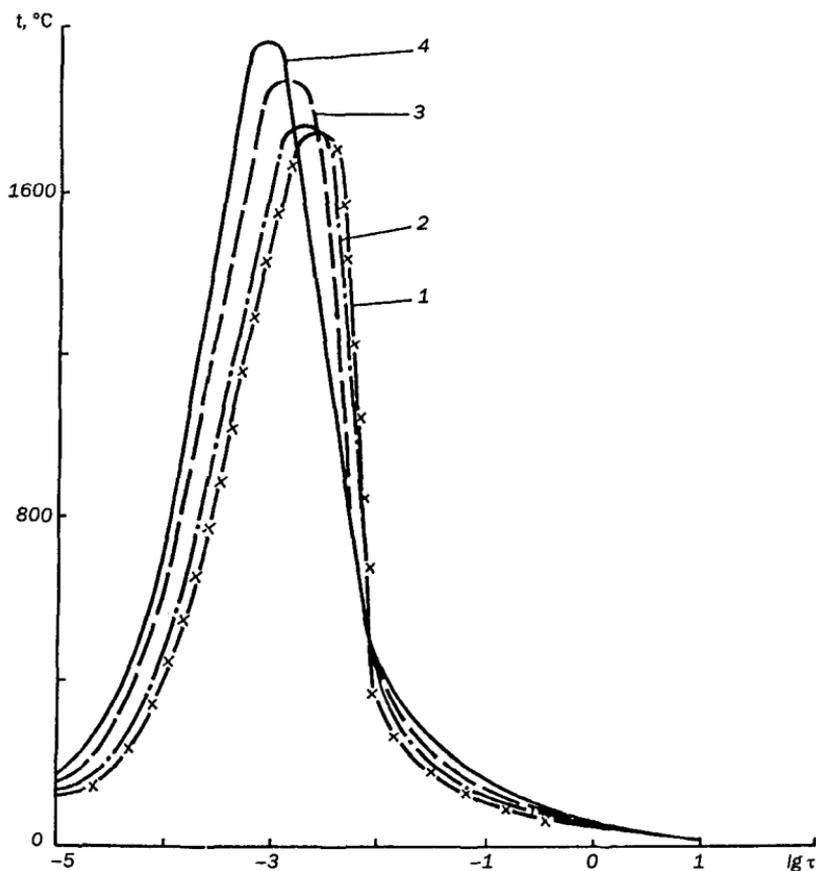


Рис. 3.2. Зависимость температуры поверхности покрытия t от времени электромагнитной наплавки τ при различных значениях плотности разрядного тока: 1) $i = 1,33 \text{ A/мм}^2$; 2) $i = 1,67 \text{ A/мм}^2$; 3) $i = 2,0 \text{ A/мм}^2$; 4) $i = 2,67 \text{ A/мм}^2$.

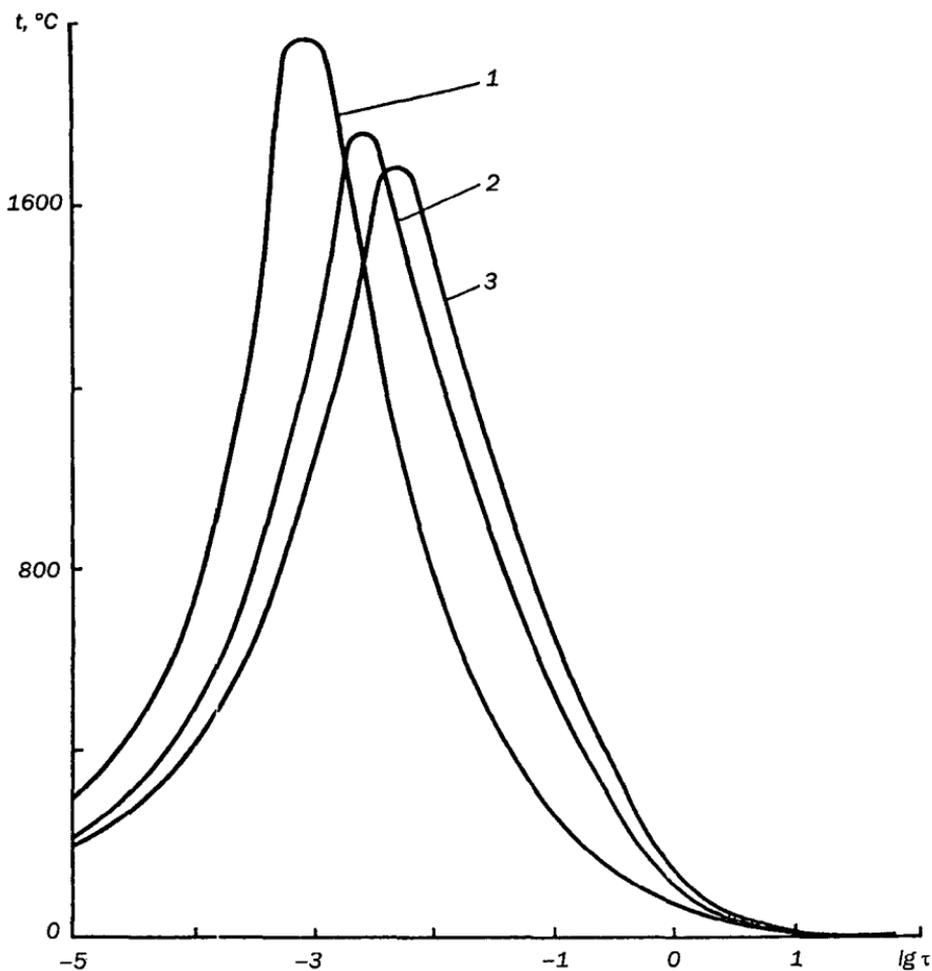


Рис. 3.3. Зависимость температуры поверхности покрытия t от времени электромагнитной накладки τ при различной толщине наплавленного слоя:
 1) $\delta_1 = 100$ мкм ; 2) $\delta_2 = 250$ мкм ; 3) $\delta_3 = 400$ мкм.

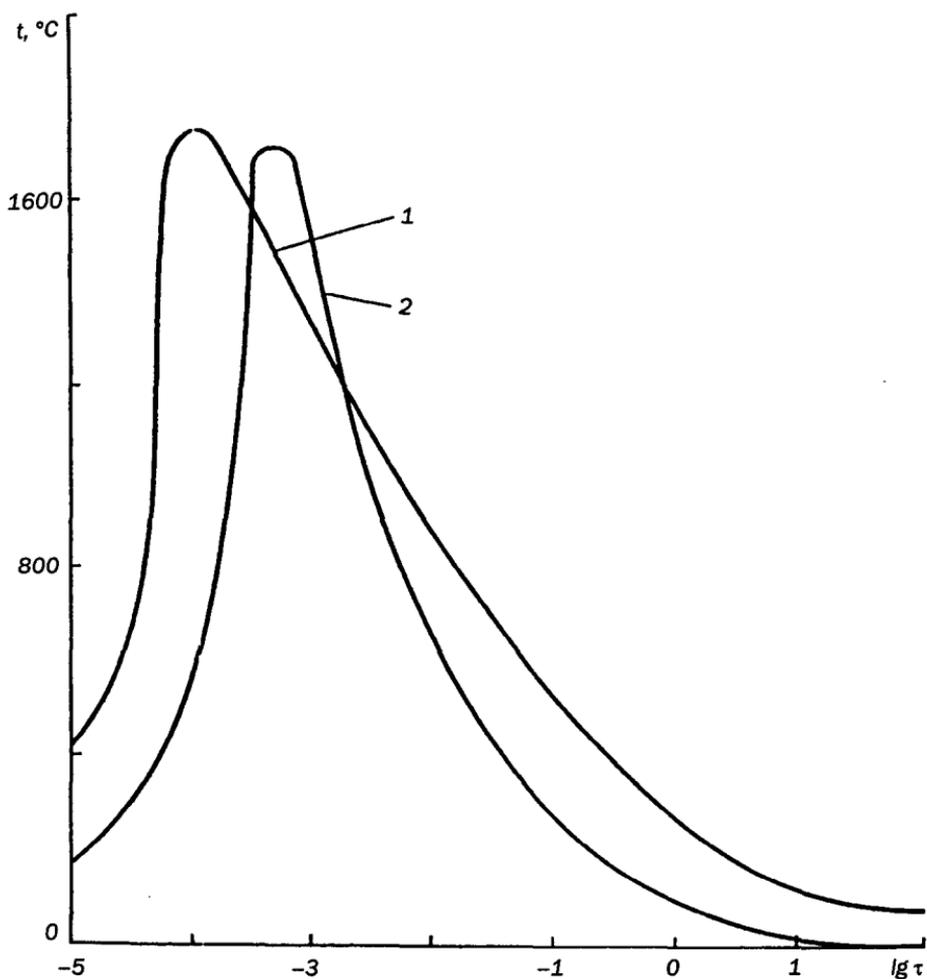


Рис. 3.4. Зависимость температуры поверхности покрытия t от времени электромагнитной наливки τ при различных коэффициентах теплоотдачи:
 1) $\alpha = 22 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 2) $\alpha = 560 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

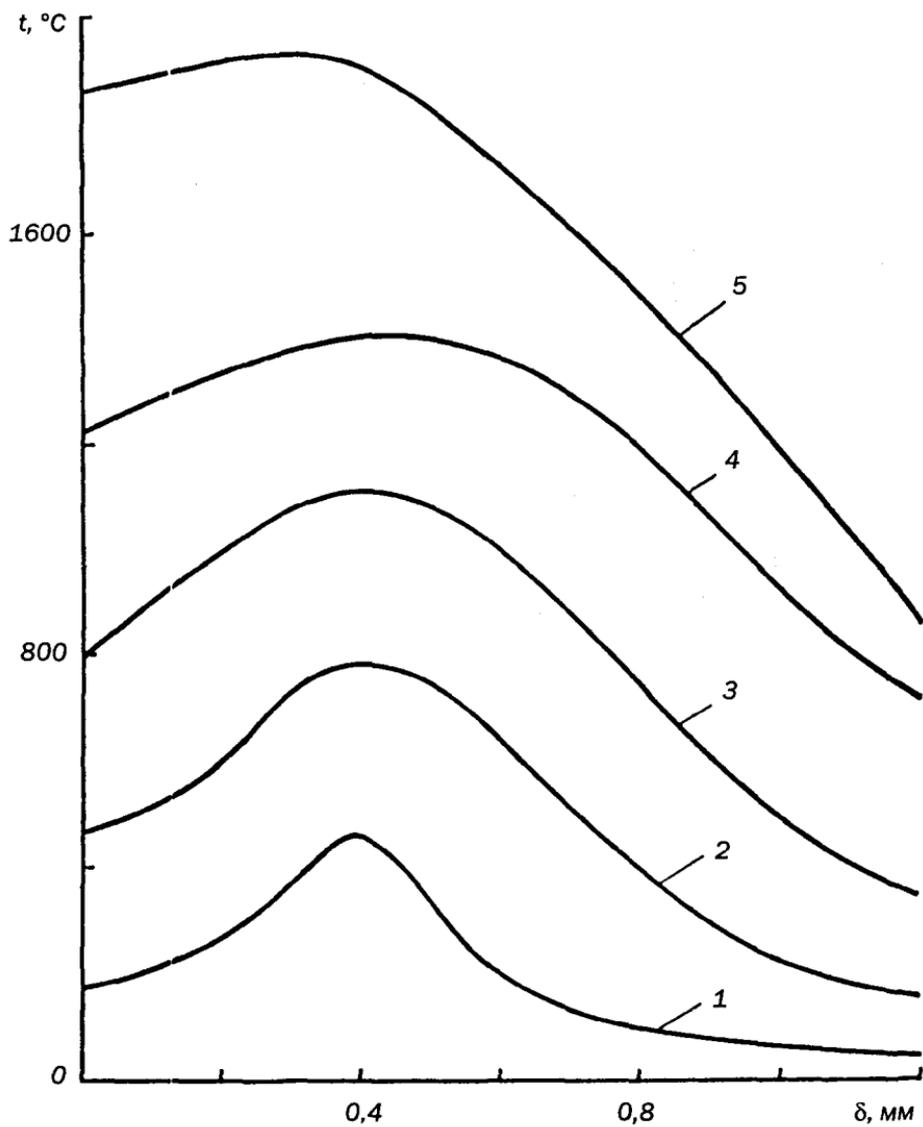
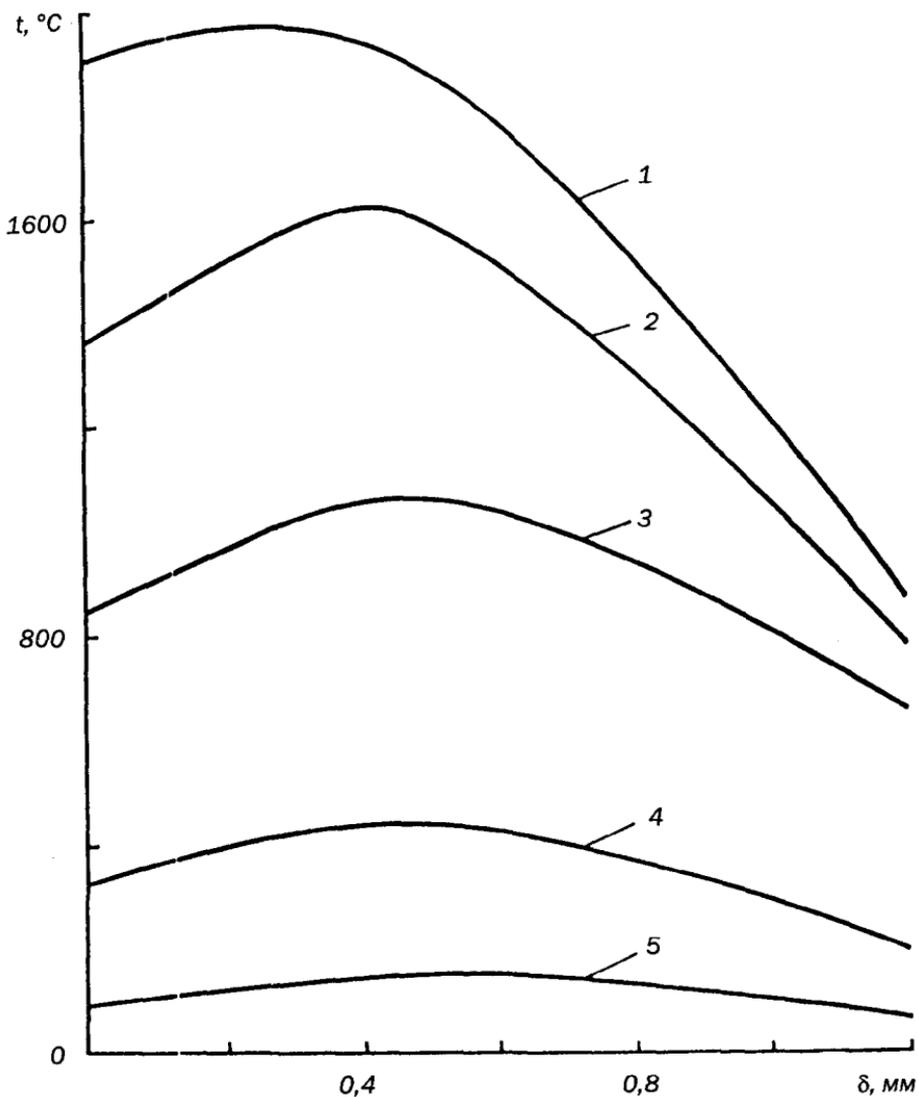


Рис. 3.5. Динамика изменения температуры t по толщине поверхностного слоя δ при электромагнитной наплавке:
 1) 0,0001 с; 2) 0,00025 с; 3) 0,001 с; 5) 0,0025 с.



*Рис. 3.6. Динамика изменения температуры t по толщине поверхностного слоя δ при охлаждении покрытия:
 1) 0,0025 с; 2) 0,005 с; 3) 0,02 с; 4) 0,06 с; 5) 0,1 с.*

3.2. Аналитический метод расчета остаточных напряжений в системе покрытие—основа

Остаточные напряжения являются одной из причин разрушения покрытий. Однако из-за многообразия факторов, влияющих на возникновение остаточных напряжений, и сложности их математического описания, многие аспекты прогнозирования и регулирования значений и знака напряжений до настоящего времени являются открытыми.

В нашем случае для оценки свойств покрытий используются следующие понятия: модуль упругости, коэффициенты линейного расширения, Пуассона, теплопроводности и т. д., усредненные по объему значительно большему, чем объем отдельно взятой капли. Поэтому кристаллизацию отдельно взятых капель расплавленного материала покрытий можно заменить модельным непрерывным процессом и проводить расчеты на основании существующих теорий физики и механики сплошной среды.

При рассмотрении наплавленного покрытия как сплошной среды, в первую очередь, представляют интерес остаточные напряжения первого рода, уравнивающиеся в объеме, соизмеримом с размерами всего изделия, т. е. усредненные по объему, значительно большему, чем объем отдельно взятой капли расплава ферромагнитного порошка. Поэтому при рассмотрении этих величин является оправданной замена кристаллизации отдельно взятых капель модельным непрерывным процессом. При этом можно определять температурную составляющую остаточных напряжений, рассматривая окончательно сформировавшееся покрытие. В действительности же остаточные напряжения формируются при постепенном приложении нагрузки и температуры до некоторых окончательных значений.

Для определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при ЭМН можно принять следующую модель процесса: длина образца достаточно велика по сравнению с его диаметром и в нем в процессе наплавки возникает подвижное квазистационарное температурное поле; напряжения в слое в момент его образования отсутствуют; остаточные напряжения на поверхности покрытия возникают в результате охлаждения образца до температуры окружающей среды.

Наплавленное покрытие следует рассматривать как сплошную среду (пористость покрытий не более 8%), что позволяет решать задачу в рамках феноменологических теорий теплообмена и механики сплошной среды.

Когда при ЭМН расплавленный материал порошка попадает на поверхность цилиндрического стержня (заготовки), она неравномерно нагревается. Температура во внешних слоях больше, чем во внутренних, т. е. температура является функцией радиуса $T = T(r)$ (рис. 3.7).

Определим деформации и напряжения, возникающие в стержне под действием этой температуры. Деформации, связанные с перемещением в радиальном направлении, выражаются зависимостью

$$\varepsilon_r = du/dr, \quad (3.14)$$

в тангенциальном

$$\varepsilon_t = u/r, \quad (3.15)$$

где u — перемещение в радиальном направлении; r — текущий радиус. Выделим элементарный участок цилиндрического стержня поперечными, радиальными и тангенциальными сечениями (рис. 3.8). По граням выделенного элемента будут возникать напряжения по всем трем направлениям.

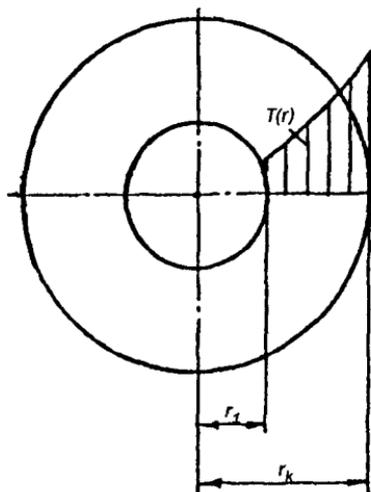


Рис. 3.7. Схема для расчета остаточных напряжений в цилиндрическом стержне.

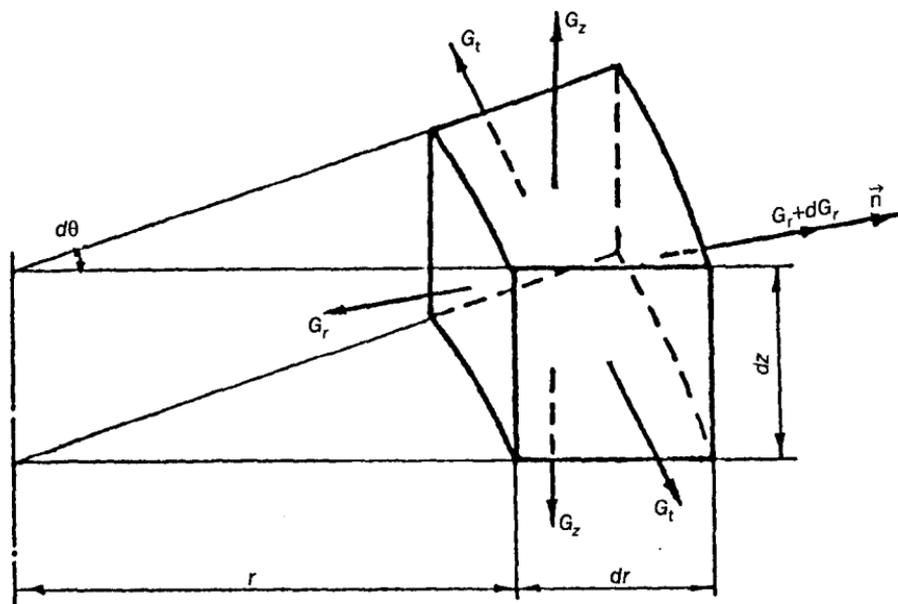


Рис. 3.8. Схема элементарного участка цилиндрического стержня с действующими напряжениями.

Запишем условие равновесия выделенного элемента:

$$(G_r + dG_r)(r + dr)d\theta dz - G_r r d\theta dz - 2G_t dr dz \frac{d\theta}{2} = 0.$$

После преобразований, пренебрегая малыми величинами второго порядка, получим

$$r d\sigma_r + (\sigma_r - \sigma_t) dr = 0$$

или

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + (\sigma_r - \sigma_t) = 0. \quad (3.16)$$

Физическая сторона задачи запишется обобщенным законом Гука с учетом температурных деформаций:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)] + \alpha T(r); \\
\varepsilon_t &= \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_z + \sigma_r)] + \alpha T(r); \\
\varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)] + \alpha T(r),
\end{aligned}
\tag{3.17}$$

где E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона; α — коэффициент линейного расширения материала цилиндра.

Преобразуя уравнение (3.17), получим

$$\begin{aligned}
\sigma_r &= 2G \left(\varepsilon_r + \frac{3\mu}{1-2\mu} \varepsilon_{\text{cp}} \right) - \frac{E}{1-2\mu} \alpha T(r); \\
\sigma_t &= 2G \left(\varepsilon_t + \frac{3\mu}{1-2\mu} \varepsilon_{\text{cp}} \right) - \frac{E}{1-2\mu} \alpha T(r); \\
\sigma_z &= 2G \left(\varepsilon_z + \frac{3\mu}{1-2\mu} \varepsilon_{\text{cp}} \right) - \frac{E}{1-2\mu} \alpha T(r),
\end{aligned}
\tag{3.18}$$

где $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ — модуль сдвига; $\varepsilon_{\text{cp}} = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z}{3}$ — среднее напряжение.

Если придерживаться гипотезы плоских сечений, то $\varepsilon_z = \text{const}$, т. е. она не зависит от радиуса r .

Находим производную:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = 2G \left(\frac{d\varepsilon_r}{dr} + \frac{3\mu}{1-2\mu} \cdot \frac{d\varepsilon_{\text{cp}}}{dr} \right) - \frac{E}{1-2\mu} \alpha \frac{dT(r)}{dr}.$$

Учитывая, что

$$\frac{d\varepsilon_{\text{cp}}}{dr} = \frac{1}{3} \left(\frac{d\varepsilon_r}{dr} + \frac{d\varepsilon_t}{dr} \right),$$

получаем

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = 2G \left[\frac{d\varepsilon_r}{dr} + \frac{\mu}{1-2\mu} \left(\frac{d\varepsilon_{\text{cp}}}{dr} + \frac{d\varepsilon_r}{dr} \right) \right] - \frac{E}{1-2\mu} \alpha \frac{dT(r)}{dr}$$

или

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = 2G \left[\frac{d\varepsilon_r}{dr} + \frac{\mu}{1-2\mu} \left(\frac{d\varepsilon_r}{dr} + \frac{d\varepsilon_t}{dr} \right) \right] - \frac{E}{1-2\mu} \alpha \frac{dT(r)}{dr}. \quad (3.19)$$

Преобразуя (3.18) и (3.19), получим уравнение (3.16) с учетом зависимостей

$$\frac{2G_r}{1-2\mu} \left[(1-\mu) \frac{d\varepsilon_r}{dr} + \mu \frac{d\varepsilon_t}{dr} \right] - \frac{E_r}{1-2\mu} \alpha \frac{dT(r)}{dr} + 2G(\varepsilon_r - \varepsilon_t) = 0. \quad (3.20)$$

Из уравнения (3.15) найдем производную

$$\frac{d\varepsilon_t}{dr} = \frac{1}{r} \left(\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right). \quad (3.21)$$

Подставим (3.14) и (3.21) в уравнение (3.20)

$$2G(1-\mu) \left(r \frac{d^2u}{dr^2} + \frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right) - F\alpha r \frac{dT(r)}{dr} = 0.$$

Известно, что $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, тогда получим

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right) - \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha \frac{dT(r)}{dr} = 0$$

или

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d(ur)}{dr} - \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha T(r) \right] = 0. \quad (3.22)$$

Проинтегрировав уравнение (3.22) дважды, найдем

$$u = Cr + \frac{D}{r} + \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{\alpha}{r} \int r T(r) dr, \quad (3.23)$$

где C и D — постоянные интегрирования.

Спроектируем все силы на ось стержня z :

$$\int_A \sigma_z dA = 0.$$

Подставим значение G_z согласно (3.18) и учтем, что $dA = 2\pi r dr$

$$\int_{\eta}^k \left\{ 2G \left[\varepsilon_r + \frac{\mu}{1-2\mu} (\varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \right] - \frac{E}{1-2\mu} \alpha T(r) \right\} 2\pi r dr = 0.$$

Произведя преобразования и учитывая, что $\varepsilon_z = const$, а $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$

получим

$$\frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{r_k^2 - r_1^2}{2} \varepsilon_z + \frac{\mu}{1+\mu} \int_{\eta}^k (\varepsilon_r + \varepsilon_t) r dr - \alpha \int_{\eta}^k r T(r) dr = 0. \quad (3.24)$$

Выразим ε_r и ε_t через перемещение u с учетом (3.23)

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = C - \frac{D}{r^2} + \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha T(r) - \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{\alpha}{r^2} \int_{\eta}^r r T(r) dr; \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\mu}{r} = C + \frac{D}{r^2} + \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{\alpha}{r^2} \int_{\eta}^r r T(r) dr. \quad (3.26)$$

Подставим (3.25) и (3.26) в уравнение (3.24)

$$\begin{aligned} \frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{r_k^2 - r_1^2}{2} \varepsilon_z + \frac{\mu}{1+\mu} \int_{\eta}^k \left[C - \frac{D}{r^2} + \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha T(r) - \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{\alpha}{r^2} \int_{\eta}^r r T(r) dr + \right. \\ \left. + C - \frac{D}{r^2} + \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{\alpha}{r^2} \int_{\eta}^r r T(r) dr \right] r dr - \alpha \int_{\eta}^k r T(r) dr = 0 \end{aligned}$$

или

$$\frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{r_k^2 - r_1^2}{2} \varepsilon_z + \frac{\mu}{1+\mu} C (r_k^2 - r_1^2) + \frac{\mu}{1-\mu} \alpha \int_{\eta}^k r T(r) dr - \alpha \int_{\eta}^k r T(r) dr = 0.$$

Откуда

$$\varepsilon_z = 2 \left[\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)^2 (r_k^2 - r_1^2)} \alpha \int_{\eta}^k r T(r) dr - \frac{\mu}{1-\mu} C \right]. \quad (3.27)$$

Подставляя ε_r , ε_t и ε_z согласно (3.25)...(3.27) в формулы (3.18), получим

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu} \left[C - \frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{D}{r^2} - \frac{\alpha}{r^2} \int_{\eta}^r rT(r)dr + \frac{2\mu\alpha}{(1-\mu)(r_k^2 - r_1^2)} \int_{\eta}^{r_k} rT(r)dr \right]; \\ \sigma_t &= \frac{E}{1-\mu} \left[C + \frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{D}{r^2} + \frac{\alpha}{r^2} \int_{\eta}^r rT(r)dr + \frac{2\mu\alpha}{(1-\mu)(r_k^2 - r_1^2)} \int_{\eta}^{r_k} rT(r)dr - \alpha T(r) \right]; \\ \sigma_z &= \frac{E\alpha}{1-\mu} \left[\frac{2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{\eta}^{r_k} rT(r)dr - T(r) \right]. \end{aligned} \right\} (3.28)$$

Учитывая, что в зависимостях для σ_z и σ_t слагаемое $\left[\frac{2\mu\alpha}{(1-\mu)(r_k^2 - r_1^2)} \int_{\eta}^{r_k} rT(r)dr \right]$ является постоянной величиной, присоединим его к постоянной C . Тогда будем иметь

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu} \left[C - \frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{D}{r^2} - \frac{\alpha}{r^2} \int_{\eta}^r rT(r)dr \right]; \\ \sigma_t &= \frac{E}{1-\mu} \left[C + \frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{D}{r^2} + \frac{\alpha}{r^2} \int_{\eta}^r rT(r)dr - \alpha T(r) \right]; \\ \sigma_z &= \frac{E\alpha}{1-\mu} \left[\frac{2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{\eta}^{r_k} rT(r)dr - T(r) \right]. \end{aligned} \right\} (3.29)$$

Постоянные интегрирования определим из граничных условий. Если к стержню не приложены внешние силы, то при $r = r_1$, $\sigma_r = 0$ и при $r = r_k$, $\sigma_r = 0$. Подставляя эти условия в уравнение (3.29) для σ_r , получим при $r = r_1$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu} \left(C - \frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{D}{r_1^2} \right) = 0, \quad (3.30)$$

при $r = r_k$

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu} \left[C - \frac{1-\mu}{1+\mu} \frac{D}{r_k^2} - \frac{\alpha}{r_k^2} \int_{\eta}^{r_k} rT(r)dr \right] = 0. \quad (3.31)$$

Из уравнений (3.30) и (3.31) найдем C и D

$$C = \frac{\alpha}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} rT(r) dr ;$$

$$D = \frac{(1+\mu)r_1^2}{(1-\mu)(r_k^2 - r_1^2)} \alpha \int_{r_1}^{r_k} rT(r) dr .$$

Подставляя значения C и D в формулы (3.23) и (3.29), определим напряжения и перемещения

$$\sigma_r = \frac{E\alpha}{(1-\mu)r^2} \left[\frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} rT(r) dr - \int_{r_1}^r rT(r) dr \right];$$

$$\sigma_t = \frac{E\alpha}{(1-\mu)r^2} \left[\frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} rT(r) dr + \int_{r_1}^r rT(r) dr - r^2 T(r) \right];$$

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\mu} \left[\frac{2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} rT(r) dr - T(r) \right];$$

$$u = \frac{\alpha}{(1-\mu)r} \left[\frac{(1-\mu)r^2 + (1-\mu)r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} rT(r) dr + (1+\mu) \int_{r_1}^r rT(r) dr \right].$$
(3.32)

Если цилиндрический стержень сплошной, то в формулах (3.32) следует положить $r = 0$. Тогда получим

$$\sigma_r = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \left[\frac{1}{r_k^2} \int_0^{r_k} rT(r) dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r rT(r) dr \right];$$

$$\sigma_t = \frac{E\alpha}{(1-\mu)} \left[\frac{1}{r_k^2} \int_0^{r_k} rT(r) dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r rT(r) dr - T(r) \right];$$

$$\sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\mu} \left[\frac{2}{r_k^2} \int_0^{r_k} rT(r) dr - T(r) \right];$$

$$u = \frac{\alpha r}{r_k^2} \int_0^{r_k} rT(r) dr + \frac{\alpha(1+\mu)}{(1-\mu)r} \int_0^r rT(r) dr.$$
(3.33)

Возникающие после интегрирования неопределенности при $r \rightarrow 0$ можно раскрыть по правилу Лопиталя.

Двухслойный цилиндрический стержень. Рассмотрим цилиндрический стержень, на который наплавляется слой другого материала (рис. 3.9, а). Внутренний радиус цилиндрического стержня обозначим r_1 , внешний r_k . Внутренний радиус наплавленного слоя тоже будет равен r_k , а внешний обозначим r_2 .

При изменении температуры в основном цилиндре и в наплавляемом слое будут возникать напряжения, которые определяются по формулам (3.29). Все, что относится к основному цилиндру обозначено с индексом «1», а к наплавленному слою — с индексом «2».

Для цилиндра согласно формулам (3.23) и (3.29) можно записать

$$u_1 = G_1 r + \frac{D_1}{r} + \frac{1 + \mu_1}{1 - \mu_1} \frac{\alpha_1}{r} \int_{\eta}^r r T_1(r) dr;$$

$$\sigma_{1r} = \frac{E_1}{1 - \mu_1^2} \left[C_1 (1 + \mu_1) - \frac{D_1}{r^2} (1 - \mu_1) \right] - \frac{E_1}{1 - \mu_1} \frac{\alpha_1}{r^2} \int_{\eta}^r r T_1(r) dr; \quad (3.34)$$

$$\sigma_{1t} = \frac{E_1}{1 - \mu_1^2} \left[C_1 (1 + \mu_1) + \frac{D_1}{r^2} (1 - \mu_1) \right] - \frac{E_1 \alpha_1}{1 - \mu_1} \left[T_1(r) - \frac{1}{r^2} \int_{\eta}^r r T_1(r) dr \right].$$

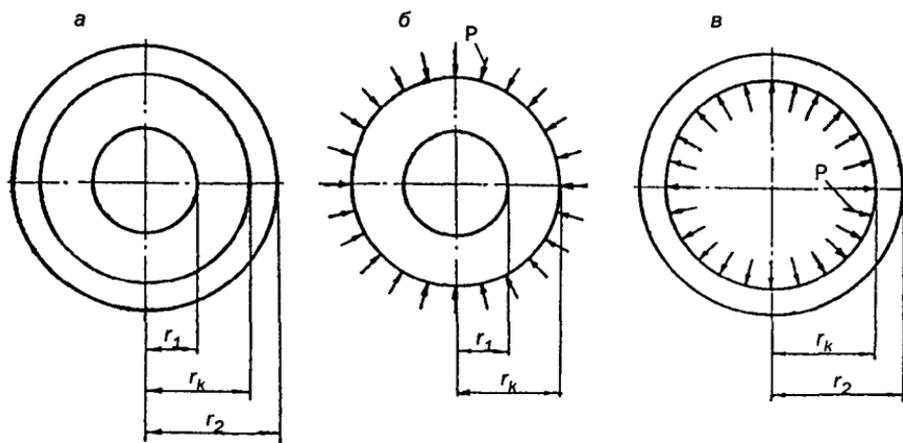


Рис. 3.9. Схема для расчета остаточных напряжений в наплавленном цилиндрическом стержне.

Для наплавленного слоя соответственно

$$\begin{aligned}
 u_2 &= G_2 r + \frac{D_2}{r} + \frac{1 + \mu_2}{1 - \mu_2} \frac{\alpha_2}{r} \int_{r_k}^r r T_2(r) dr; \\
 \sigma_{2r} &= \frac{E_2}{1 - \mu_2^2} \left[C_2 (1 + \mu_2) - \frac{D_2}{r^2} (1 - \mu_2) \right] - \frac{E_2}{1 - \mu_2} \frac{\alpha_2}{r^2} \int_{r_k}^r r T_2(r) dr; \\
 \sigma_{2t} &= \frac{E_2}{1 - \mu_2^2} \left[C_2 (1 + \mu_2) + \frac{D_2}{r^2} (1 - \mu_2) \right] - \frac{E_2 \alpha_2}{1 - \mu_2} \left[T_2(r) - \frac{1}{r^2} \int_{r_k}^r r T_2(r) dr \right].
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

В связи с тем, что коэффициенты линейного расширения материала основного цилиндра и наплавленного материала различны, а также в связи с неравномерным распределением температуры по радиусу, в месте контакта цилиндров будет возникать давление p (рис. 3.9, б, в).

Будет считать, что между основными цилиндрами и наплавленным слоем существует хорошая адгезионная связь.

Для определения постоянных интегрирования можно использовать следующие граничные условия:

- для основного цилиндра при $r = r_1$, $\sigma_{1r} = 0$; при $r = r_k$, $\sigma_{1r} = -p$;
- для наплавленного слоя при $r = r_k$, $\sigma_{1r} = -p$; при $r = r_2$, $\sigma_{2r} = 0$;
- для цилиндра в целом при $r = r_k$, $u = u_2$.

Рассмотрим эти условия.

1. При $r = r_1$, $\sigma_{1r} = 0$

$$\frac{E_1}{1 - \mu_1^2} \left[C_1 (1 + \mu_1) - \frac{D_1}{r_1^2} (1 - \mu_1) \right] = 0. \tag{3.36}$$

2. При $r = r_k$, $\sigma_{1r} = -p$

$$\frac{E_1}{1 - \mu_1^2} \left[C_1 (1 + \mu_1) - \frac{D_1}{r_1^2} (1 - \mu_1) \right] - \frac{E_1 \alpha_1}{(1 - \mu_1^2) r_k^2} \int_{r_k}^{r_1} r T_1(r) dr = -p. \tag{3.37}$$

3. При $r = r_k$, $\sigma_{1r} = -p$

$$\frac{E_2}{1 - \mu_2^2} \left[C_2 (1 + \mu_2) - \frac{D_2}{r_k^2} (1 - \mu_2) \right] = -p. \tag{3.38}$$

4. При $r = r_2, \sigma_{2r} = 0$

$$\frac{E_2}{1-\mu_2^2} \left[C_2(1+\mu_2) - \frac{D_2}{r_2^2}(1-\mu_2) \right] - \frac{E_2\alpha_2}{(1-\mu_2^2)r_2^2} \int_{\eta}^{\zeta} rT_2(r)dr = 0. \quad (3.39)$$

5. При $r = r_k, u = u_2$

$$C_1r_k + \frac{D_1}{r_k} + \frac{(1+\mu_1)\alpha_1}{(1-\mu_1)r_k} \int_{\eta}^{\zeta} rT_1(r)dr = C_2r_k + \frac{D_2}{r_k}. \quad (3.40)$$

Решая совместно систему уравнений (3.36)...(3.40), определим C_1, D_1, C_2, D_2 и p .

Из уравнения (3.36)

$$D_1 = \frac{1+\mu_1}{1-\mu_1} r_1^2 C_1. \quad (3.41)$$

Подставим (3.41) в уравнение (3.37)

$$\frac{E_1}{1-\mu_1^2} \left[C_1(1+\mu_1) - (1+\mu_1) \frac{r_1^2}{r_k^2} C_1 \right] - \frac{E_1\alpha_1}{(1-\mu_1)r_k^2} \int_{\eta}^{\zeta} rT_1(r)dr = -p.$$

Откуда

$$C_1 = \frac{1-\mu_1}{r_k^2 - r_1^2} \left[\frac{\alpha_1}{1-\mu_1} \int_{\eta}^{\zeta} rT_1(r)dr - \frac{r_k^2}{E_1} p \right]. \quad (3.42)$$

Подставим (3.42) и формулу (3.41)

$$D_1 = \frac{(1-\mu_1)r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \left[\frac{\alpha_1}{1-\mu_1} \int_{\eta}^{\zeta} rT_1(r)dr - \frac{r_k^2}{E_1} p \right]. \quad (3.43)$$

Из уравнения (3.39)

$$D_2 = \frac{(1+\mu_2)r_2^2}{1-\mu_2} C_2 - \alpha_2 \frac{1+\mu_2}{1-\mu_2} \int_{\eta}^{\zeta} rT_2(r)dr. \quad (3.44)$$

Подставим (3.44) в уравнение (3.38)

$$C_2(1+\mu_2) - \frac{(1+\mu_2)r_2^2}{r_k^2} C_2 + \alpha_2 \frac{1+\mu_2}{r_k^2} \int_{\eta}^{\zeta} rT_2(r)dr = -p \frac{1-\mu_2^2}{E_2}.$$

Откуда

$$C_2 = \frac{1-\mu_2}{r_2^2 - r_k^2} \left[\frac{\alpha_2}{1-\mu_2} \int_{\eta}^{\eta} r T_2(r) dr + \frac{r_k^2}{E_2} p \right]. \quad (3.45)$$

Подставляя (3.45) и формулу (3.44), получим

$$D_2 = \frac{(1+\mu_2)r_k^2}{r_2^2 - r_k^2} \left[\frac{\alpha_2}{1-\mu_2} \int_{\eta}^{\eta} r T_2(r) dr + \frac{r_2^2}{E_2} p \right]. \quad (3.46)$$

Подставим значение постоянных интегрирования в уравнение (3.40)

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1-\mu_1}{r_k^2 - r_1^2} \left[\frac{\alpha_1}{1-\mu_1} \int_{\eta}^{\eta} r T_1(r) dr - \frac{r_k^2}{E_1} p \right] + \\ &+ \frac{(1-\mu_1)r_1^2}{(r_k^2 - r_1^2)r_k} \left[\frac{\alpha_1}{1-\mu_1} \int_{\eta}^{\eta} r T_1(r) dr - \frac{r_k^2}{E_1} p \right] + \frac{(1+\mu_1)\alpha_1}{(1-\mu_1)r_k} \int_{\eta}^{\eta} r T_1(r) dr = \\ &= \frac{(1-\mu_2)r_k}{r_2^2 - r_k^2} \left[\frac{\alpha_2}{1-\mu_2} \int_{\eta}^{\eta} r T_2(r) dr + \frac{r_2^2}{E_2} p \right] + \frac{(1+\mu_2)r_k^2}{r_2^2 - r_k^2} \left[\frac{\alpha_2}{1-\mu_2} \int_{\eta}^{\eta} r T_2(r) dr + \frac{r_2^2}{E_2} p \right] \end{aligned}$$

Из последнего уравнения

$$p = \frac{\frac{2\alpha_1}{(1-\mu_1)(r_k^2 - r_1^2)} \int_{\eta}^{\eta} r T_1(r) dr - \frac{2\alpha_2}{(1-\mu_2)(r_2^2 - r_k^2)} \int_{\eta}^{\eta} r T_2(r) dr}{\frac{(1-\mu_1)r_k^2 + (1+\mu_1)r_1^2}{E_1(r_k^2 - r_1^2)} + \frac{(1-\mu_2)r_k^2 + (1+\mu_2)r_2^2}{E_2(r_2^2 - r_k^2)}}. \quad (3.47)$$

Для определения напряжений σ_z запишем уравнение равновесия на ось z

$$\int_{A_1} \sigma_{1z} dA_1 + \int_{A_2} \sigma_{2z} dA_2 = 0 \quad (3.48)$$

и уравнение совместимости деформаций

$$\epsilon_{1z} = \epsilon_{2z}. \quad (3.49)$$

В уравнении (3.48) перейдем к интегрированию по радиусу, приняв $dA = 2\pi r dr$

$$2\pi \int_{\eta}^{\eta} \sigma_{1z} r dr + 2\pi \int_{\eta}^{\eta} \sigma_{2z} r dr = 0$$

или

$$\int_{\eta}^{\eta} \sigma_{1z} r dr + \int_{\eta}^{\eta} \sigma_{2z} r dr = 0. \quad (3.50)$$

Согласно общему закону Гука (3.18)

$$\sigma_{1z} = 2G_1 \left(\varepsilon_{1z} + \frac{3\mu_1}{1-2\mu_1} \varepsilon_{1cp} \right) - \frac{E_1}{1-2\mu_1} \alpha_1 T_1(r);$$

$$\sigma_{2z} = 2G_2 \left(\varepsilon_{2z} + \frac{3\mu_2}{1-2\mu_2} \varepsilon_{2cp} \right) - \frac{E_2}{1-2\mu_2} \alpha_2 T_2(r).$$

С учетом G и ε_{cp} последние уравнения можно представить следующим образом:

$$\sigma_{1z} = \frac{E_1}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)} \left[(1-\mu_1)\varepsilon_{1z} + \mu_1(\varepsilon_{1r} + \varepsilon_{1r}) - (1+\mu_1)\alpha_1 T_1(r) \right];$$

$$\sigma_{2z} = \frac{E_2}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)} \left[(1-\mu_2)\varepsilon_{2z} + \mu_2(\varepsilon_{2r} + \varepsilon_{2r}) - (1+\mu_2)\alpha_2 T_2(r) \right]. \quad (3.51)$$

Подставим σ_{1z} и σ_{2z} в уравнение (3.50)

$$\frac{E_1}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)} \int_{\eta}^{\eta} \left[(1-\mu_1)\varepsilon_{1z} + \mu_1(\varepsilon_{1r} + \varepsilon_{1r}) - (1+\mu_1)\alpha_1 T_1(r) \right] r dr +$$

$$+ \frac{E_2}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)} \int_{\eta}^{\eta} \left[(1-\mu_2)\varepsilon_{2z} + \mu_2(\varepsilon_{2r} + \varepsilon_{2r}) - (1+\mu_2)\alpha_2 T_2(r) \right] r dr = 0.$$

Учитывая, что ε_{1z} и ε_{2z} не зависят от радиуса r , получим

$$\frac{E_1(1-2\mu_1)(r_k^2 - r_1^2)}{2(1+\mu_1)(1-2\mu_1)} \varepsilon_{1z} + \frac{E_1\mu_1}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)} \int_{\eta}^{\eta} (\varepsilon_{1r} + \varepsilon_{1r}) r dr - \frac{E_1\alpha_1}{1-2\mu_1} \int_{\eta}^{\eta} r T_1(r) dr +$$

$$+ \frac{E_2(1-2\mu_2)(r_2^2 - r_k^2)}{2(1+\mu_2)(1-2\mu_2)} \varepsilon_{2z} + \frac{E_2\mu_2}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)} \int_{\eta}^{\eta} (\varepsilon_{2r} + \varepsilon_{2r}) r dr - \frac{E_2\alpha_2}{1-2\mu_2} \int_{\eta}^{\eta} r T_2(r) dr.$$

Если использовать уравнение совместимости деформаций (3.49), то из последнего уравнения найдем

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{1z} = \mathcal{E}_{1r} = & \frac{1}{B_1 + B_2} \left[\frac{E_1 \alpha_1}{1 - 2\mu_1} \int_{r_1}^{r_k} r T_1(r) dr + \frac{E_2 \alpha_2}{1 - 2\mu_2} \int_{r_k}^{r_2} r T_2(r) dr - \right. \\ & \left. - \frac{E_1 \mu_1}{(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)} \int_{r_1}^{r_k} (\mathcal{E}_{1r} + \mathcal{E}_{1r}) r dr - \frac{E_2 \mu_2}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)} \int_{r_k}^{r_2} (\mathcal{E}_{2r} + \mathcal{E}_{2r}) r dr \right], \end{aligned} \quad (3.52)$$

где

$$B_1 = \frac{E_1(1 - \mu_1)(r_k^2 - r_1^2)}{2(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)}; \quad B_2 = \frac{E_2(1 - \mu_2)(r_2^2 - r_k^2)}{2(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)}. \quad (3.53)$$

Учитывая (3.25) и (3.26), найдем сумму деформаций $\mathcal{E}_r + \mathcal{E}_z$ для основного цилиндра и для наплавляемого слоя

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{1r} + \mathcal{E}_{1z} &= 2C_1 + \frac{1 + \mu_1}{1 - \mu_1} \alpha_1 T_1(r); \\ \mathcal{E}_{2r} + \mathcal{E}_{2z} &= 2C_2 + \frac{1 + \mu_2}{1 - \mu_2} \alpha_2 T_2(r). \end{aligned} \quad (3.54)$$

Подставим (3.54) в (3.52)

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{1z} = \mathcal{E}_{2z} = & \frac{1}{B_1 + B_2} \left[\frac{E_1 \alpha_1}{1 - \mu_1} \int_{r_1}^{r_k} r T_1(r) dr + \frac{E_2 \alpha_2}{1 - \mu_2} \int_{r_k}^{r_2} r T_2(r) dr - \right. \\ & \left. - \frac{E_1 \mu_1 (r_k^2 - r_1^2)}{(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)} C_1 - \frac{E_2 \mu_2 (r_2^2 - r_k^2)}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)} C_2 \right]. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Когда по формулам (3.42) и (3.45) определены постоянные интегрирования C_1 и C_2 , то по формуле (3.55) можно определить \mathcal{E}_{1z} и \mathcal{E}_{2z} .

Подставим (3.54) в формулы (3.51)

$$\begin{aligned} \sigma_{1z} &= \frac{E_1}{(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)} [(1 - \mu_1) \mathcal{E}_{1z} + 2\mu_1 C_1] - \frac{E_1 \alpha_1}{1 - \mu_1} T_1(r); \\ \sigma_{2z} &= \frac{E_2}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)} [(1 - \mu_2) \mathcal{E}_{2z} + 2\mu_2 C_2] - \frac{E_2 \alpha_2}{1 - \mu_2} T_2(r). \end{aligned} \quad (3.56)$$

После того как найдены C_1 , C_2 , \mathcal{E}_{1z} и \mathcal{E}_{2z} , формулы (3.56) позволяют определить напряжения, возникающие в основном цилиндре и в наплавляемом слое в сечениях, перпендикулярных оси стержня, т. е. напряжения σ_z .

Таким образом, при известном распределении температур в основном цилиндре $T_1(r)$ и в наплавляемом слое $T_2(r)$ по формуле (3.47) можно определить давление p , а зная p , по формулам (3.42)...(3.46) — постоянные интегрирования C_1 , D_1 , C_2 , D_2 . Затем по формуле (3.55) можно определить \mathcal{E}_{1z} и \mathcal{E}_{2z} и, наконец, по формулам (3.34), (3.35) и (3.56) — напряжения в основном цилиндре и в наплавляемом слое.

Если основной цилиндр сплошной, то в формулах следует сделать допущение, что $r_1 = 0$.

Тогда получим

$$p^* = \frac{\frac{2\alpha_1}{r_k^2(1-\mu_1)} \int_0^{r_1} rT_1(r)dr - \frac{2\alpha_2}{(1-\mu_2)(r_2^2 - r_k^2)} \int_{r_k}^{r_2} rT_2(r)dr}{\frac{(1-\mu_1)}{E_1} + \frac{(1-\mu_2)r_k^2 + (1+\mu_2)r_2^2}{E_2(r_2^2 - r_k^2)}};$$

$$C_1^* = \frac{1-\mu_1}{r_k^2} \left(\frac{\alpha_1}{1-\mu_1} \int_0^{r_1} rT_1(r)dr - \frac{r_k^2}{E_1} p^* \right); \quad D_1^* = 0;$$

$$B_1^* = \frac{E_1(1-\mu_1)r_k^2}{2(1+\mu_1)(1-2\mu_1)}; \quad B_2^* = \frac{E_2(1-\mu_2)(r_2^2 - r_k^2)}{2(1+\mu_2)(1-2\mu_2)};$$

$$C_2^* = \frac{1-\mu_2}{r_2^2 - r_k^2} \left(\frac{\alpha_2}{1-\mu_2} \int_{r_k}^{r_2} rT_2(r)dr + \frac{r_k^2}{E_2} p^* \right);$$

$$D_2^* = \frac{(1+\mu_2)r_k^2}{r_2^2 - r_k^2} \left(\frac{\alpha_2}{1-\mu_2} \int_{r_k}^{r_2} rT_2(r)dr + \frac{r_k^2}{E_2} p^* \right);$$

$$\mathcal{E}_{1z}^* = \mathcal{E}_{2z}^* = \frac{1}{B_1^* + B_2^*} \left[\frac{E_1\alpha_1}{1-\mu_1} \int_0^{r_1} rT_1(r)dr + \frac{E_2\alpha_2}{1-\mu_2} \int_{r_k}^{r_2} rT_2(r)dr - \right. \\ \left. - \frac{E_1\mu_1 r_k^2}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)} C_1^* - \frac{E_2\mu_2(r_2^2 - r_k^2)}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)} C_1^* \right].$$

Определяем напряжения для случая, когда основной цилиндр сплошной:

- для основного цилиндра

$$\begin{aligned}\sigma_{1r}^* &= \frac{E_1}{1-\mu_1} \left(C_1^* - \frac{\alpha_1}{r^2} \int_0^r r T_1(r) dr \right); \\ \sigma_{1t}^* &= \frac{E_1}{1-\mu_1} \left(C_1^* - \alpha_1 T_1(r) - \frac{1}{r^2} \int_0^r r T_1(r) dr \right); \\ \sigma_{1z}^* &= \frac{E_1}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)} \left[(1-\mu_1) \mathcal{E}_{1z}^* + 2\mu_1 C_1^* \right] - \frac{E_1 \alpha_1}{1-\mu_1} T_1(r);\end{aligned}\quad (3.57)$$

- для наплавляемого слоя

$$\begin{aligned}\sigma_{2r}^* &= \frac{E_2}{1-\mu_2^2} \left[C_2^*(1+\mu_2) - \frac{D_2}{r^2} (1+\mu_2) \right] \frac{E_2 \alpha_2}{(1-\mu_2) r^2} \int_r^r r T_2(r) dr; \\ \sigma_{2t}^* &= \frac{E_2}{1-\mu_2^2} \left[C_2^*(1+\mu_2) - \frac{D_2}{r^2} (1+\mu_2) \right] - \frac{E_2 \alpha_2}{(1-\mu_2) r^2} \left[T_2(r) - \frac{1}{r^2} \int_r^r r T_2(r) dr \right]; \\ \sigma_{2z}^* &= \frac{E_2}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)} \left[(1-\mu_2) \mathcal{E}_{2z}^* + 2\mu_2 C_2^* \right] - \frac{E_2 \alpha_2}{1-\mu_2} T_2(r).\end{aligned}\quad (3.58)$$

Остаточные напряжения. В процессе наплавки на основной цилиндр подается расплавленный металл при некоторой температуре T . Частицы расплавленного материала при соприкосновении с поверхностью основного цилиндра очень быстро остывают, и к моменту сцепления наплавляемого металла с цилиндром температура его равна T_2 ($T_2 = 150 \dots 250^\circ\text{C}$). Следовательно, на внешней поверхности цилиндра при $r = r_k$ можно принять расчетную температуру T_2 . С уменьшением радиуса r она будет резко падать, т. к. продолжительность наплавки небольшая и температура не успевает достигнуть больших значений на достаточной глубине. Если записать уравнение теплопроводности для цилиндра, то, решив его, можно найти величины распределения температуры по радиусу.

Проведенные опыты показали, что с достаточной точностью распределение температуры по радиусу можно описать зависимостью

$$T(r) = T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n, \quad (3.59)$$

где T_0 — температура в центре цилиндра ($r = 0$) в предположении, что цилиндр сплошной; n — положительное число; $T_2^* = T_2 - T_0$.

Так как толщина наплавляемого слоя относительно небольшая, то температуру слоя можно считать постоянной по толщине и равной T_2 .

В основном цилиндре при наплавке будут возникать напряжения от неравномерного распределения температуры. Эти напряжения будем называть напряжениями наплавки и обозначать с индексом «Н». Ввиду того, что температура T_2 небольшая, упругие константы основного цилиндра можно считать постоянными, не зависящими от температуры.

Напряжения наплавки в основном цилиндре определяются по формуле (3.32)

$$\begin{aligned} \sigma_{1r(H)} &= \frac{E_1 \alpha_1}{(1 - \mu_1) r^2} \left\{ \frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^r r \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] dr - \int_{r_1}^r r \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] dr \right\} = \\ &= \frac{E_1 \alpha_1}{(1 - \mu_1) r^2} \left\{ \frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \left[\frac{r^2 - r_1^2}{2} T_0 + \frac{T_2^* r_k^2}{n + 2} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] \right] - \frac{T_0}{2} r^2 - r_1^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{T_2^* r_k^2}{n + 2} \left[\left(\frac{r}{r_k} \right)^{n+2} - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] \right\}; \quad (3.60) \\ \sigma_{1t(H)} &= \frac{E_1 \alpha_1}{(1 - \mu_1) r^2} \left\{ \frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^r r \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] dr + \int_{r_1}^r r \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] dr - \right. \\ &\quad \left. - r^2 \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] \right\} = \frac{E_1 \alpha_1}{(1 - \mu_1) r^2} \left\{ \frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \left[\frac{r^2 - r_1^2}{2} T_0 + \frac{T_2^* r_k^2}{n + 2} \left(1 - \frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_0}{2} (r^2 - r_1^2) + \frac{T_2^* r_k^2}{n + 2} \left[\left(\frac{r}{r_k} \right)^{n+2} - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] - r^2 \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{1z(H)} &= \frac{E_1\alpha_1}{1-\mu_1} \left\{ \frac{2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} r \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] dr - \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] \right\} = \\ &= \frac{E_1\alpha_1}{1-\mu_1} \left\{ \frac{2}{r_k^2 - r_1^2} \left[\frac{T_0}{2} r_k^2 - r_1^2 + \frac{T_2^* r_k^2}{n+2} \left(1 - \frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] - \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] \right\}.\end{aligned}$$

Ввиду различия коэффициентов линейного расширения материала цилиндра и наплавленного слоя и неравномерного распределения температуры по радиусу, при остывании появляются напряжения как в основном цилиндре, так и в наплавленном слое. Эти напряжения будем называть напряжениями остывания и обозначать с индексом «О».

Для определения напряжений остывания в основном цилиндре необходимо в формулы (3.34) подставить $T_1(r) = -\left[T_0 + T_2^* (r/r_k)^n \right]$, а для определения напряжений остывания в наплавленном слое подставить в формулы (3.35) $T_2(r) = -T_2$.

Напряжения остывания в основном цилиндре будут равны

$$\begin{aligned}\sigma_{1r(O)} &= \frac{E_1}{1-\mu_1^2} \left[C_{1(O)}(1+\mu_2) - \frac{D_{1(O)}}{r^2}(1-\mu_1) \right] + \frac{E_1\alpha_1}{(1-\mu_1)r^2} \left\{ \frac{(r^2 - r_1^2)}{2} T_0 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_2^* r_k^2}{n+2} \left[\left(\frac{r}{r_k} \right)^{n+2} - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] \right\}; \\ \sigma_{1t(O)} &= \frac{E_1}{1-\mu_1^2} \left[C_{1(O)}(1+\mu_1) - \frac{D_{1(O)}}{r^2}(1-\mu_1) \right] + \frac{E_1\alpha_1}{(1-\mu_1)r^2} \left\{ \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] - \right. \\ &\quad \left. - \frac{T_2^* r_k^2}{(n+2)r_k^2} \left[\left(\frac{r}{r_k} \right)^{n+2} - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] - \frac{T_0}{2r^2} (r^2 - r_1^2) \right\}; \\ \sigma_{1z(O)} &= \frac{E_1}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)} \left[(1-\mu_1)\epsilon_{1z(O)} + 2\mu_1 C_{1(O)} \right] + \frac{E_1\alpha_1}{1-\mu_1} \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right].\end{aligned}\quad (3.61)$$

Напряжения остывания в наплавляемом слое

$$\begin{aligned}\sigma_{2r(0)} &= \frac{E_2}{1-\mu_2^2} \left[C_{2(0)}(1+\mu_2) - \frac{D_{2(0)}}{r^2}(1-\mu_2) \right] + \frac{E_2\alpha_2T_2}{(1-\mu_2)r^2} \frac{(r^2-r_1^2)}{2}; \\ \sigma_{2t(0)} &= \frac{E_2}{1-\mu_2^2} \left[C_{2(0)}(1+\mu_2) - \frac{D_{2(0)}}{r^2}(1-\mu_2) \right] + \frac{E_2\alpha_2T_2}{(1-\mu_2)r^2} \left(1 - \frac{r^2-r_k^2}{2r^2} \right); \\ \sigma_{2z(0)} &= \frac{E_2}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)} \left[(1-\mu_2)\varepsilon_{2z(0)} + 2\mu_2C_{2(0)} \right] + \frac{E_2\alpha_2T_2}{1-\mu_2}.\end{aligned}\quad (3.62)$$

Но для определения напряжений остывания по формулами (3.61) и (3.62) необходимо постоянные интегрирования, деформации $\varepsilon_{1z(0)}$ и $\varepsilon_{2z(0)}$ и давление p на границе слоя определить с учетом распределения температуры по слоям. Подставляя

$$T_1(r) = -\left[T_0 + T_2^*(r/r_k)^n \right], \quad T_2(r) = -T_2 \quad (3.63)$$

в формулы (3.42)...(3.47), получим

$$\begin{aligned}P_{(0)} &= \frac{\frac{\alpha_2T_2}{1-\mu_2} - \frac{\alpha_1T_0}{1-\mu_1} - \frac{2\alpha_1T_2^*r_k^2}{(1-\mu_2)(r_k^2-r_1^2)(n+2)} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right]}{\frac{(1-\mu_1)r_k^2 + (1+\mu_1)r_1^2}{E_1(r_k^2-r_1^2)} + \frac{(1-\mu_2)r_k^2 + (1+\mu_2)r_2^2}{E_2(r_2^2-r_k^2)}}; \\ C_{1(0)} &= -\frac{1-\mu_1}{r_k^2-r_1^2} \left\{ \frac{\alpha_1T_0}{2(1-\mu_1)}(r_k^2-r_1^2) + \frac{\alpha_1T_2^*r_k^2}{(1-\mu_1)(n+2)} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] + \frac{r_k^2}{E_1} P_{(0)} \right\}; \\ D_{1(0)} &= -\frac{(1+\mu_1)r_1^2}{r_k^2-r_1^2} \left\{ \frac{\alpha_1T_0}{2(1-\mu_1)}(r_k^2-r_1^2) + \frac{\alpha_1T_2^*r_k^2}{(1-\mu_1)(n+2)} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] + \frac{r_k^2}{E_1} P_{(0)} \right\}; \\ C_{2(0)} &= \frac{1-\mu_2}{r_2^2-r_k^2} \left(\frac{r_k^2}{E_2} P_{(0)} - \frac{\alpha_2T_2}{1-\mu_2} \frac{r_2^2-r_k^2}{2} \right); \\ D_{2(0)} &= -\frac{(1+\mu_2)r_k^2}{r_2^2-r_k^2} \left(\frac{r_k^2}{E_2} P_{(0)} - \frac{\alpha_2T_2}{1-\mu_2} \frac{r_2^2-r_k^2}{2} \right).\end{aligned}$$

После того как определили $C_{1(O)}$ и $C_{2(O)}$ с учетом распределения температуры по слоям, можно по формуле (3.55) определить $\mathcal{E}_{1z(O)}$ и $\mathcal{E}_{2z(O)}$, если подставить $T_1(r)$ и $T_2(r)$ согласно (3.63)

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{1z(O)} = \mathcal{E}_{2z(O)} = & -\frac{1}{B_1 + B_2} \left\{ \frac{E_1 \alpha_1}{1 - \mu_1} \int_{r_k}^{r_1} r \left[T_0 - T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right] dr + \right. \\ & \left. + \frac{E_2 \alpha_2}{1 - \mu_2} \int_{r_k}^{r_2} r T_2 dr + \frac{E_1 \mu_1 (r_k^2 - r_1^2)}{(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)} C_{1(O)} + \frac{E_2 \mu_2 (r_2^2 - r_k^2)}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)} C_{2(O)} \right\} = \\ = & \frac{1}{B_1 + B_2} \left\{ \frac{E_1 \alpha_1 T_0}{2(1 - \mu_1)} (r_k^2 - r_1^2) + \frac{E_1 \alpha_1 T_2^* r_k^2}{(1 - \mu_1)(n + 2)} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{E_2 \alpha_2 (r_2^2 - r_k^2)}{2(1 - \mu_2)} + \frac{E_1 \mu_1 (r_k^2 - r_1^2)}{(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)} C_{1(O)} + \frac{E_2 \mu_2 (r_2^2 - r_k^2)}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)} C_{2(O)} \right\}. \end{aligned} \quad (3.65)$$

Таким образом, подставив константы согласно формулам (3.64) и (3.65) в формулы (3.61) и (3.62), определим напряжения, возникающие при остывании. Полные остаточные напряжения в основном цилиндре будут складываться из напряжений, возникающих при наплавлении, и напряжений, возникающих при остывании

$$\begin{aligned} \sigma_{1r(n)} &= \sigma_{1r(H)} + \sigma_{1r(O)}; \\ \sigma_{1t(n)} &= \sigma_{1t(H)} + \sigma_{1t(O)}; \\ \sigma_{1z(n)} &= \sigma_{1z(H)} + \sigma_{1z(O)}. \end{aligned} \quad (3.66)$$

Остаточные напряжения в наплавленном слое будут равны напряжениям, возникающим при остывании

$$\sigma_{2r(n)} = \sigma_{2r(O)}; \quad \sigma_{2t(n)} = \sigma_{2t(O)}; \quad \sigma_{2z(n)} = \sigma_{2z(O)}. \quad (3.67)$$

Если основной цилиндр сплошной, то для определения напряжений следует в формулах (3.60)...(3.65) принять $r_1 = 0$. В этом случае напряжения наплавки в цилиндре будут определяться по формулам

$$\begin{aligned}
\sigma_{1r(H)}^* &= \frac{E_1 \alpha_1 T_2^*}{(1 - \mu_1)(n + 2)} \left[1 - \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right]; \\
\sigma_{1t(H)}^* &= \frac{E_1 \alpha_1 T_2^*}{(1 - \mu_1)(n + 2)} \left[1 - (1 + n) \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right]; \\
\sigma_{1z(H)}^* &= \frac{E_1 \alpha_1 T_2^*}{(1 - \mu_1)(n + 2)} \left[2 - (2 + n) \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right].
\end{aligned} \tag{3.68}$$

Напряжения, возникающие в цилиндре при остывании

$$\begin{aligned}
\sigma_{1r(O)}^* &= \frac{E_1}{1 - \mu_1^2} \left[C_{1(O)}^* (1 + \mu_1) + \frac{D_{1(O)}^*}{r^2} (1 - \mu_1) \right] + \frac{E_1 \alpha_1}{1 - \mu_1} \left[\frac{T_0}{2} + \frac{T_2^*}{n + 2} \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right]; \\
\sigma_{1t(O)}^* &= \frac{E_1}{1 - \mu_1^2} \left[C_{1(O)}^* (1 + \mu_1) + \frac{D_{1(O)}^*}{r^2} (1 - \mu_1) \right] + \frac{E_1 \alpha_1}{1 - \mu_1} \left[\frac{T_0}{2} + T_2^* \frac{n + 1}{n + 2} \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right]; \\
\sigma_{1z(O)}^* &= \frac{E_1}{(1 + \mu_1)(1 - 2\mu_1)} \left[(1 - \mu_1) \mathcal{E}_{1(O)}^* + 2\mu_1 C_{1(O)}^* \right] + \frac{E_1 \alpha_1}{1 - \mu_1} \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right].
\end{aligned} \tag{3.69}$$

Напряжения, возникающие в наплавленном слое при остывании

$$\begin{aligned}
\sigma_{2r(O)}^* &= \frac{E_2}{1 - \mu_2^2} \left[C_{2(O)}^* (1 + \mu_2) + \frac{D_{2(O)}^*}{r^2} (1 - \mu_2) \right] + \frac{E_2 \alpha_2 T_2^*}{(1 - \mu_2)r^2} \frac{r^2 - r_k^2}{2}; \\
\sigma_{2t(O)}^* &= \frac{E_2}{1 - \mu_2^2} \left[C_{2(O)}^* (1 + \mu_2) + \frac{D_{2(O)}^*}{r^2} (1 - \mu_2) \right] + \frac{E_2 \alpha_2 T_2^*}{(1 - \mu_2)} \left(1 - \frac{r^2 - r_k^2}{2r^2} \right); \\
\sigma_{2z(O)}^* &= \frac{E_2}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)} \left[(1 - \mu_2) \mathcal{E}_{2(O)}^* + 2\mu_2 C_{2(O)}^* \right] + \frac{E_2 \alpha_2 T_2^*}{1 - \mu_2}.
\end{aligned} \tag{3.70}$$

Чтобы определить напряжения по формулам (3.69) и (3.70), необходимо знать константы с учетом распределения температуры по слоям, когда основной цилиндр сплошной.

Для этого в формулах (3.64) и (3.65) следует принять $r_1 = 0$.

Тогда получим

$$P_{(0)}^* = \frac{\frac{\alpha_2 T_2}{1-\mu_2} - \frac{\alpha_1 T_0}{1-\mu_1} - \frac{2\alpha_1 T_2^*}{(1-\mu_2)(n+2)}}{\frac{1-\mu_1}{E_1} + \frac{(1-\mu_2)r_k^2 + (1+\mu_2)r_2^2}{E_2(r_2^2 - r_k^2)}};$$

$$C_{1(0)}^* = -\left[\frac{\alpha_1 T_0}{2} + \frac{\alpha_1 T_2^*}{n+2} + \frac{(1-\mu_1)P_{(0)}^*}{E_1} \right]; \quad D_{1(0)}^* = 0;$$

$$C_{2(0)}^* = \frac{1-\mu_2}{r_2^2 - r_k^2} \left(\frac{r_k^2}{E_2} P_{(0)}^* - \frac{\alpha_2 T_2}{1-\mu_2} \frac{r_2^2 - r_k^2}{2} \right); \quad (3.71)$$

$$D_{2(0)}^* = -\frac{(1+\mu_2)r_k^2}{r_2^2 - r_k^2} \left(\frac{r_k^2}{E_2} P_{(0)}^* - \frac{\alpha_2 T_2}{1-\mu_2} \frac{r_2^2 - r_k^2}{2} \right);$$

$$\mathcal{E}_{1z(0)}^* = \mathcal{E}_{2z(0)}^* = -\frac{1}{B_1^* + B_2^*} \left[\frac{E_1 \alpha_1 T_0 r_k^2}{2(1-\mu_1)} - \frac{E_1 \alpha_1 T_2^* r_k^2}{(1-\mu_1)(n+2)} + \frac{E_2 \alpha_2 (r_2^2 - r_k^2)}{2(1-\mu_2)} + \frac{E_1 \mu_1 r_k^2}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)} C_{1(0)}^* + \frac{E_2 \mu_2 (r_2^2 - r_k^2)}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)} C_{2(0)}^* \right].$$

Полные остаточные напряжения в основном цилиндрическом стержне определяются как сумма по (3.66).

Остаточные напряжения в наплавленном слое в случае, когда основной стержень сплошной, будут определяться аналогично (3.67).

Из приведенных расчетов видно, что при наплавке как в стержне, так и в наплавленном слое возникает объемное напряженное состояние, поэтому расчет наиболее целесообразно проводить с учетом основных законов теории прочности.

Так, по энергетической теории прочности эквивалентное напряжение в стержне будет равно

$$\sigma_{1s} = \sqrt{0,5 \left[(\sigma_{1r} - \sigma_{1t})^2 + (\sigma_{1t} - \sigma_{1z})^2 + (\sigma_{1z} - \sigma_{1r})^2 \right]}, \quad (3.72)$$

а в наплавленном слое

$$\sigma_{23} = \sqrt{0,5[(\sigma_{2r} - \sigma_{2t})^2 + (\sigma_{2t} - \sigma_{2z})^2 + (\sigma_{2z} - \sigma_{2r})^2]}, \quad (3.73)$$

что позволяет по эквивалентным напряжениям судить о величине остаточных напряжений в покрытии в зависимости от основных характеристик материала порошка, применяемого для ЭМН.

3.3. Определение упругих характеристик покрытий

Определение упругих характеристик материалов осуществляют механическими, электрическими, магнитными, резонансными и другими способами. Так как материалы покрытий, полученных ЭМН, обладают определенной прочностью и не разрушаются при незначительных деформациях, их упругие характеристики можно определять стандартными методами.

Модуль упругости (E) определяется при испытании образцов на изгиб по трехточечной схеме. Прогиб образца f замеряется под точкой приложения силы с помощью индикатора. Нагружение проводится в пределах справедливости закона Гука. По данным измерений строятся диаграммы в координатах сила—прогиб (рис. 3.10).

Диаграмма зависимости прогиба f от силы F показывает (рис. 3.10), что экспериментальные точки достаточно хорошо ложатся на прямые, то есть наблюдается прямолинейная зависимость между прогибом f и силой F . Как известно, в этом случае прогиб можно определить по формуле

$$f = \frac{Fl^3}{48EI_x}, \quad (3.74)$$

где E — модуль упругости; I_x — момент инерции поперечного сечения стержня относительно оси x .

Из формулы (3.74) следует, что

$$E = \frac{Fl^3}{48fI_x}. \quad (3.75)$$

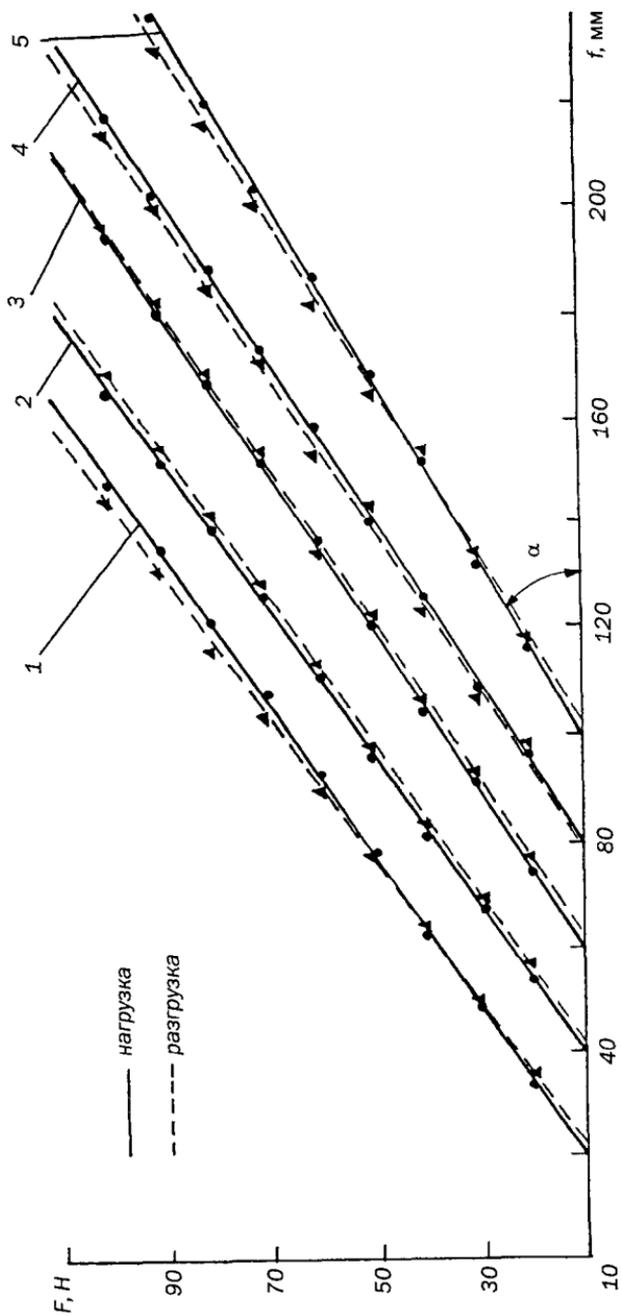


Рис. 3.10. Диаграмма зависимости прогиба f от силы F нагружения образца:

Если учесть, что $I_x = b \cdot h^3 / 12$, где b — ширина, h — высота образца, и обозначить $K = F/f$, то формула (3.75) примет вид

$$E = \frac{Kl^3}{4bh^3}. \quad (3.76)$$

Анализ результатов испытаний (рис. 3.10) показывает, что K представляет собой тангенс угла наклона диаграмм изгиба к оси f , т. е. $K = \operatorname{tg} \alpha$.

Коэффициент линейного расширения (α) определяется с помощью кварцевого dilatометра. Dilатометрическая ячейка состоит из кварцевой трубки и толкателя. Исследуемый образец помещается между выступом на нижнем конце трубки и толкателем. Перемещение толкателя измеряется с помощью индикатора. При изменении температуры удлинение образца за вычетом удлинения кварцевой трубки, равной по длине образцу, передается толкателем на индикатор. Точность определения коэффициента линейного расширения в данном случае в основном зависит от точности индикатора.

Для испытания исследуемых материалов порошков нагрев образца проводится от 20 до 120°C. Среднее значение коэффициента линейного расширения кварца в принятом диапазоне температур $\alpha_{\text{кв}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Коэффициенты линейного расширения исследуемых материалов порошков определяются по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta l}{lT} + \alpha_{\text{кв}},$$

где Δl — среднее значение удлинения образца, мм; l — длина образца, мм; T — температура нагрева образца, °C.

Коэффициент Пуассона (μ) определяется путем возбуждения в исследуемом образце стоячей волны изгибных колебаний. Суть метода заключается в том, что, если в стержне прямоугольного поперечного сечения возбудить стоячую волну, то в первую половину периода колебаний слой материала выше нейтральной оси будет испытывать по длине стержня деформацию растяжения, а слой материала ниже нейтральной оси — деформацию сжатия. Во вторую половину периода колебаний картина изменится на обратную: верхний слой материала стержня будет испытывать деформацию сжатия, а нижний — деформацию растяжения.

Периодические продольные деформации растяжения и сжатия с частотой собственных колебаний стержня вызывают поперечные сокращения слоев материала, величина которых зависит от коэффициента Пуассона материала.

Схема устройства для измерения коэффициента Пуассона путем возбуждения в исследуемом образце стоячей волны изгибных колебаний состоит из двух мостов Уинстона, один из которых служит для измерения продольной деформации, другой — для измерения поперечной деформации.

Коэффициент Пуассона определяется по формуле

$$\mu = \Delta V_{\text{поп}} / \Delta V_{\text{пр}},$$

где $\Delta V_{\text{поп}}$ — амплитуда напряжения на выходе моста для измерения периодической поперечной деформации; $\Delta V_{\text{пр}}$ — амплитуда напряжения на выходе моста для измерения периодической продольной деформации.

Результаты исследования упругих характеристик и коэффициента линейного расширения электромагнитных покрытий представлены в табл. 3.3.

Табл. 3.3.
Модуль упругости первого рода, коэффициенты линейного расширения и Пуассона покрытий.

№№	Материалы порошка	$E, 10^{10} \text{ Н/м}^2$	$\alpha, 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	μ
1	Fe-10%V	20,21	11,2	0,25
2	Fe-Ti	15,39	11,2	0,33
3	C-300	18,03	8,6	0,31
4	P6M5Ф3	17,83	10,06	0,32
5	ПЖРВ2	19,54	11,5	0,30

3.4. Расчетно-экспериментальное определение остаточных напряжений в покрытии и основе

В процессе формирования покрытий, полученных ЭМН, в результате различия температур, коэффициентов линейного расширения покрытия и основы и удельных объемов при фазовых превращениях, возникают остаточные напряжения, которые изменяют адгезионную прочность покрытий, оказывают влияние на их эксплуатационные свойства и, в ряде случаев, приводят к образованию трещин.

Температурные условия формирования покрытий оказывают основное влияние на их свойства, поэтому представляет интерес определение области температур покрытия и основы по условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела покрытие—основа.

Расчетные соотношения (3.69), (3.70), (3.72), (3.73) позволили разработать логическую блок-схему алгоритма и составить программу для численных исследований остаточных напряжений в системе покрытие—основа (рис.3.11).

При определении остаточных напряжений для каждого образца задавались теплофизические и упругие характеристики материалов покрытия и основы, геометрические параметры системы, диапазон температур, который обеспечивался режимом ЭМН. Приняли, что покрытия наплавляются на основу из стали 45 порошками $Fe-10\%V$, $Fe-Ti$, С-300, Р6М5Ф3, ПЖРВ2.

Результаты численного расчета на ЭВМ остаточных напряжений в системе покрытие—основа представлены на рис. 3.12—3.14. Анализ исследований результатов показывает, что величина остаточных напряжений в зависимости от условий ЭМН может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Характер распределения остаточных напряжений не зависит от температурного режима наплавки и материала порошка. Видно, что тангенциальные напряжения в покрытии положительные (растягивающие), а в основе — отрицательные (сжимающие), радиальные — отрицательные как в покрытии, так и в основе. С повышением температуры в системе покрытие—основа остаточные напряжения возрастают. Например, для покрытия $Fe-10\%V$, наплавленного на сплошной цилиндр (рис. 3.13), при температуре поверхности основы $150^{\circ}C$ тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности покрытия равны 283 МПа, при $200^{\circ}C$ — 395 МПа, а при $300^{\circ}C$ — 618 МПа, т. е. напряжения увеличиваются в 1,4 и 2,2 раза. При тех же условиях тангенциальные сжимающие напряжения на поверхности основы соответственно равны 7,18; 10,0; 15,7 МПа. Следовательно, с возрастанием температуры увеличение тангенциальных напряжений в основе аналогично увеличению их в покрытии. Такая закономерность характерна и для других исследуемых материалов порошков. Так, например, наименьшие остаточные напряжения в принятом диапазоне температур имеют покрытия из порошка С-300, наибольшие — ПЖРВ2 (рис. 3.14).

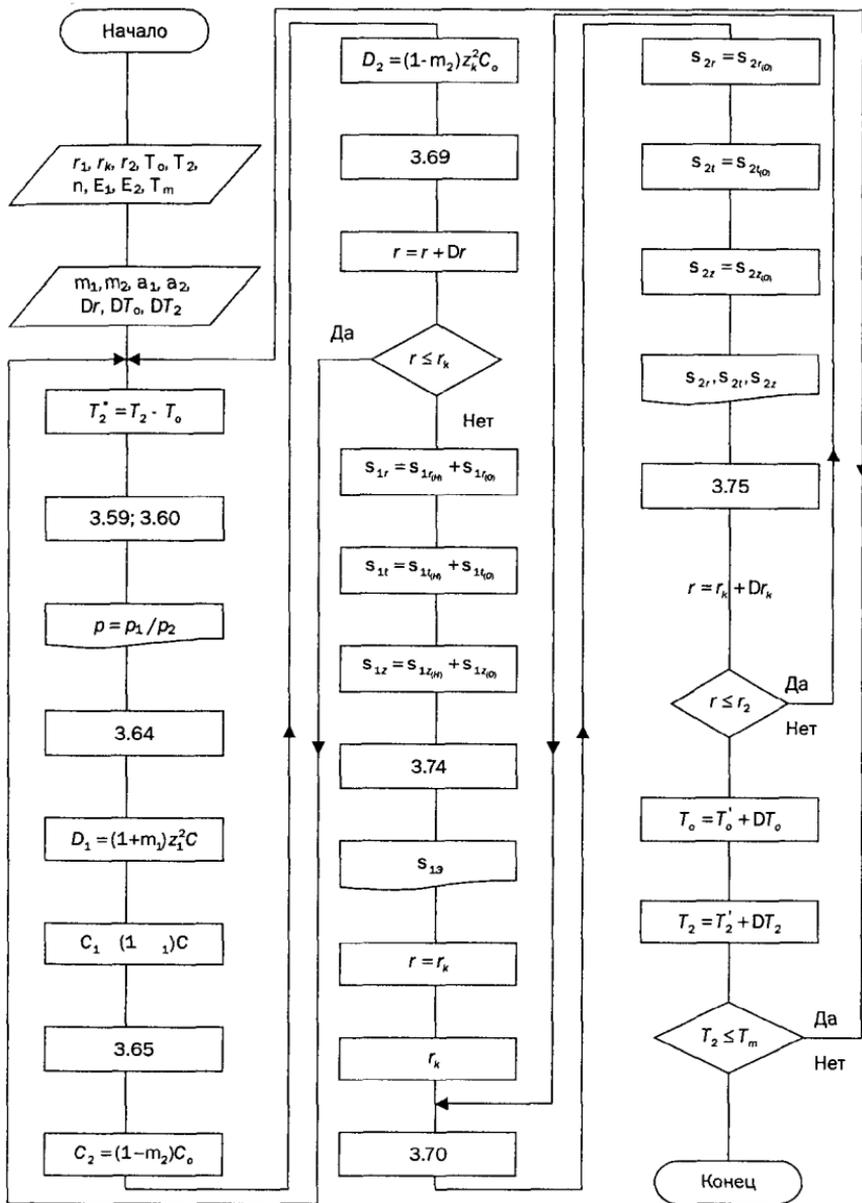


Рис. 3.11. Логическая блок-схема алгоритма для расчета остаточных напряжений в системе покрытие—основа.

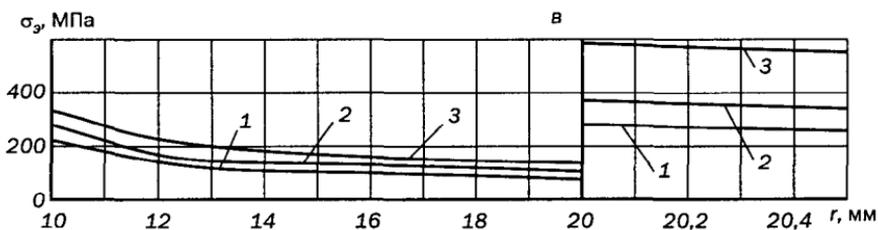
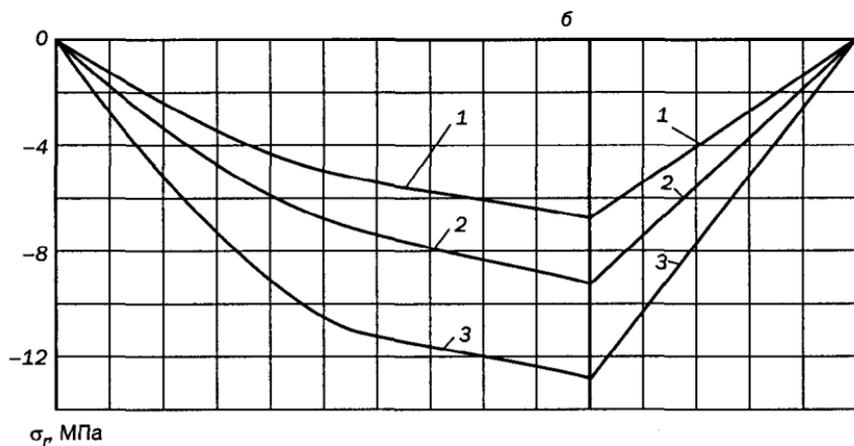
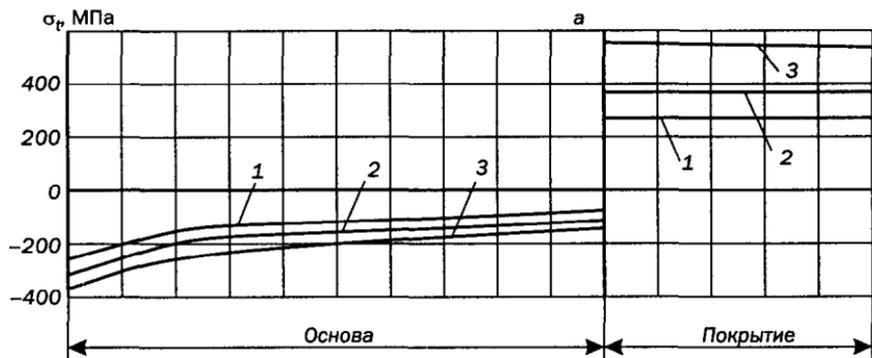


Рис. 3.12. Распределение тангенциальных (а), радиальных (б) и эквивалентных (в) остаточных напряжений по толщине покрытия Fe-10%V и основы (полый цилиндр) из стали 45 в зависимости от температуры нагрева поверхности основы: 1) $t = 150^{\circ}\text{C}$; 2) $t = 200^{\circ}\text{C}$; 3) $t = 300^{\circ}\text{C}$.

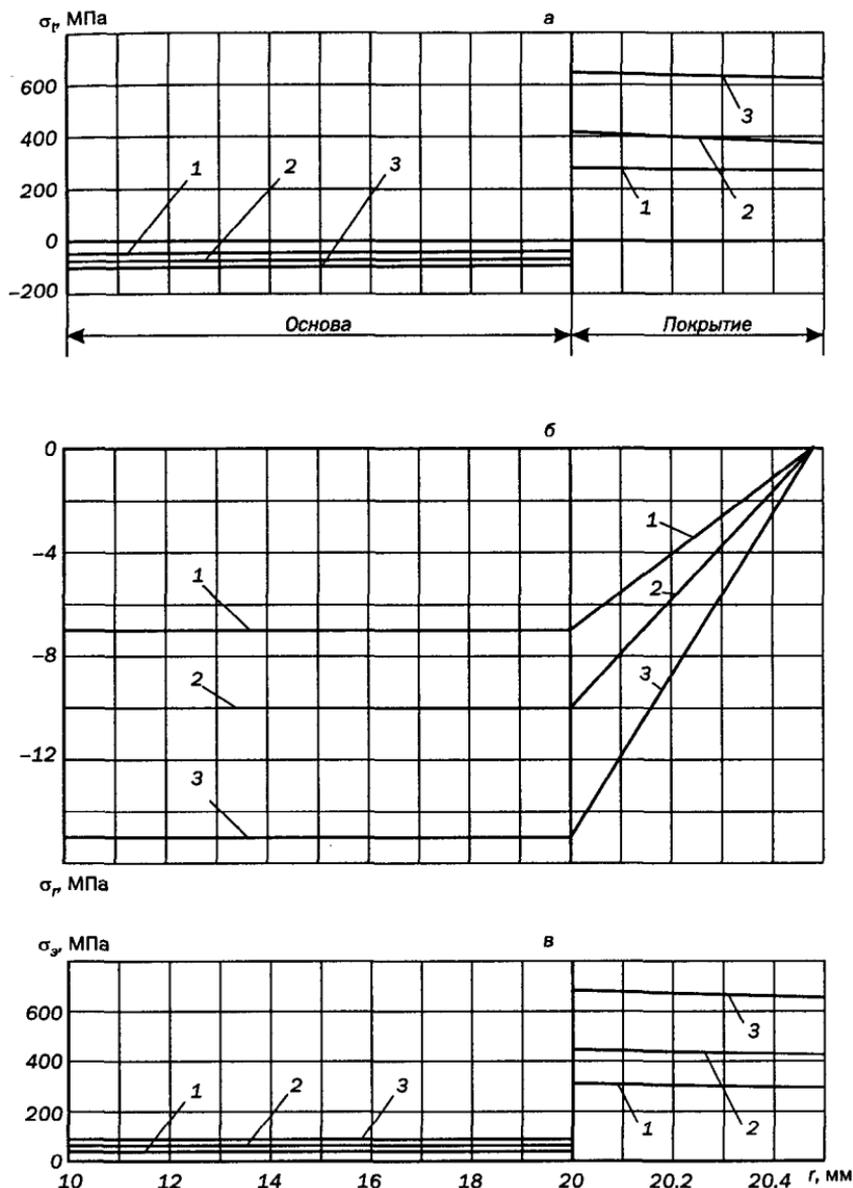


Рис. 3.13. Распределение тангенциальных (а), радиальных (б) и эквивалентных (в) остаточных напряжений по толщине покрытия Fe-10%V и основы (сплошной цилиндр) из стали 45 в зависимости от температуры нагрева поверхности основы: 1) $t = 150^\circ\text{C}$; 2) $t = 200^\circ\text{C}$; 3) $t = 300^\circ\text{C}$.

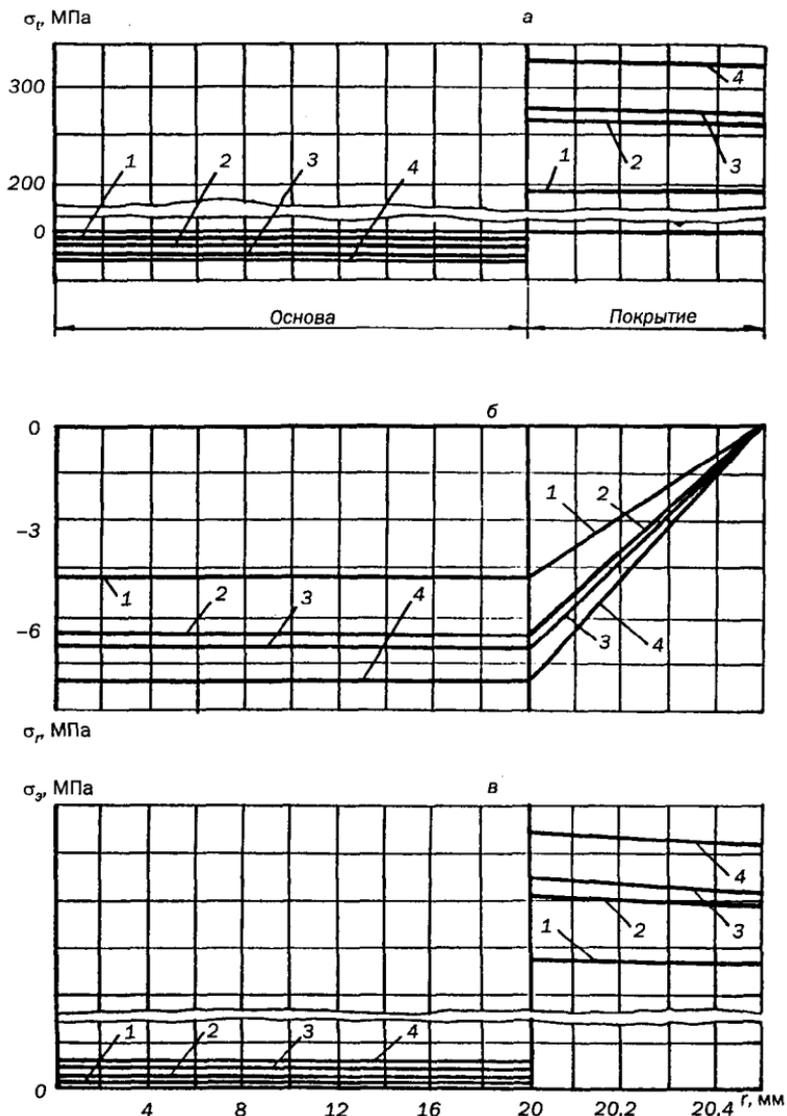


Рис. 3.14. Распределение тангенциальных (а), радиальных (б) и эквивалентных (в) остаточных напряжений по толщине покрытия и основы (сплошной цилиндр) из стали 45 при температуре нагрева поверхности основы 150°C в зависимости от материалов наплавленных порошков: 1 — С-300; 2 — Fe-Ti; 3 — P6M5Ф3; 4 — ПЖРВ2.

В сплошном цилиндре радиальные и эквивалентные напряжения, также как и тангенциальные, при увеличении температуры в системе покрытие—основа, повышаются. При этом закономерность их роста аналогична тангенциальным напряжениям: при увеличении температуры поверхности основы со 150°C до 200°C радиальные и эквивалентные напряжения увеличиваются в 1,4 раза, до 300°C — в 2,2 раза.

Следует отметить, что эквивалентные напряжения в покрытии значительно большие, чем в основе.

Анализ численных расчетов остаточных напряжений (рис. 3.12—3.14) показывает, что при наплавке покрытия на полый цилиндр закономерность распределения напряжений в покрытии и в основе отличается от распределения в сплошном цилиндре. Так, при возрастании температуры напряжения в покрытии увеличиваются больше, чем в основе. Например, если внешний радиус цилиндра в два раза больше внутреннего и температура увеличивается в два раза, т. е. от 150°C до 300°C, эквивалентные напряжения в покрытии увеличиваются в 2,12 раза, а в основе — только в 1,5—1,7 раза. Кроме того, в полном цилиндре на поверхности основы тангенциальные и эквивалентные остаточные напряжения большие, а в покрытии меньшие, чем в сплошном. Радиальные — наоборот, на внешней стороне основы меньшие, а на внутренней — практически не регистрируются. Например, если радиус отверстия составляет половину внешнего радиуса цилиндра и наплавка производится при равных условиях, то тангенциальные и эквивалентные остаточные напряжения в покрытии уменьшаются на 8—10% по сравнению с напряжениями в сплошном цилиндре. Все это является следствием того, что на механизм формирования остаточных напряжений как в покрытии, так и в основе существенно влияет масса и форма заготовки.

Таким образом, численные расчеты показывают, что при температуре 300°C в системе покрытие—основа в покрытиях появляются значительные эквивалентные остаточные напряжения, которые для сплошного цилиндра в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:

697(ПЖРВ2)→655(Fe-10%V)→583(P6M5Ф3)→551(Fe-Ti)→427(C-300).

Для тех же покрытий при температуре 150°C имеем следующую последовательность убывания эквивалентных остаточных напряжений:

323(ПЖРВ2)→302(*Fe-10%V*)→266(Р6М5Ф3)→253(*Fe-Ti*)→189(С-300).

По условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела покрытие—основа наиболее благоприятными для эксплуатационных условий будут покрытия из ферромагнитных порошков С-300 и *Fe-Ti*, которые имеют наименьшие растягивающие остаточные напряжения в покрытии. Так, растягивающие остаточные напряжения в покрытии из порошка С-300, полученном ЭМН (температура в системе покрытие—основа 150°C), будут в 1,7 раза меньше, чем в покрытии из порошка ПЖРВ2, и в 1,6 раза меньше, чем из порошка *Fe-10%V*.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

4.1. Классификация и область использования методов упрочнения деталей машин

Правильный подбор технологических методов формирования требуемого качества поверхностного слоя материала деталей машин — одно из условий повышения их работоспособности. К настоящему времени накоплен большой опыт создания износостойких поверхностей путем использования различных технологических методов воздействия на поверхность деталей машин, целенаправленно изменяющих физико-механические свойства в процессе упрочнения, что способствует повышению эксплуатационных характеристик деталей и надежности всего изделия.

В зависимости от условий эксплуатации машин методы упрочнения можно условно разделить на три группы (табл. 4.1).

Табл. 4.1.
Взаимосвязь условий эксплуатации и методов упрочнения.

Условия эксплуатации деталей машин	Методы технологического воздействия (упрочнения)
1. Циклические нагрузки, требующие высокой усталостной прочности материалов.	Силовое и тепловое воздействие на поверхностные слои деталей машин для их упрочнения.
2. Износ различных видов, требующий высокой износостойкости материалов.	Методы защиты поверхностного слоя, улучшающие триботехнические свойства поверхности.
3. Сложные условия циклических нагрузжений с одновременным изнашиванием отдельных поверхностей.	Комбинированные методы технологического воздействия.

Из трех указанных групп (табл. 4.1) к **первой** можно отнести методы поверхностного пластического деформирования (ППД), термической (ТО), химико-термической (ХТО) и термомеханической (ТМО) обработки. Применение этих методов вызывает деформационные, структурные, фазовые изменения или изменения по химсоставу поверхностного слоя материала детали.

Ко второй группе относятся методы, связанные с нанесением различных твердых покрытий из разнообразных материалов — металлов, сплавов, керамики, пластмасс и т. п. В результате применения этих методов физико-химическое состояние поверхностного слоя может значительно отличаться от основы. К ним относятся наплавка и напыление, а также различные виды покрытий: электролитические, химические, плазменные, электромагнитные, полимерные и др.

К третьей группе относятся комбинированные методы обработки (КМО), у которых процесс преобразования или нанесения материала происходит в результате одновременного протекания двух или более воздействий на поверхность изделия. Одним из особенностей КМО является их реализация на специальном оборудовании, совмещающем эти процессы. При этом в КМО обычно устраняются специфические недостатки, присущие каждому из них, а преимущества становятся более явными.

Выбор того или иного метода зависит от конструкции детали, ее жесткости, материала, кинематической схемы и технологических возможностей процесса упрочнения. Наибольшее применение в промышленности нашли технологические методы силового воздействия на поверхностные слои деталей. К этим методам, прежде всего, относятся методы ППД (рис. 4.1). Наиболее распространены в промышленности обкатка и раскатка шариками и роликами, обработка дробью, алмазное выглаживание.

Все используемые методы ППД можно условно разделить на две группы: статические и динамические. При статических методах обработки инструмент или среда воздействуют на обрабатываемую поверхность с определенной постоянной силой P , происходит плавное перемещение очагов (очага) воздействия по поверхности. При этом инерционные силы не оказывают существенного влияния на ППД. К таким методам относятся различные виды выглаживания (рис. 4.2, а) и накатывания (рис. 4.2, б), а также метод однократного обжатия обрабатываемой поверхности (рис. 4.2, в) без перемещения очагов воздействия.

При динамических методах (рис. 4.2, г) инструмент или среда многократно воздействуют на обрабатываемую поверхность или на ее часть, при этом

сила воздействия P в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого значения P_i до максимума, а в случае локального ударного воздействия очаг деформирования может (как и в статических методах) последовательно и равномерно перемещаться по всей обрабатываемой поверхности.

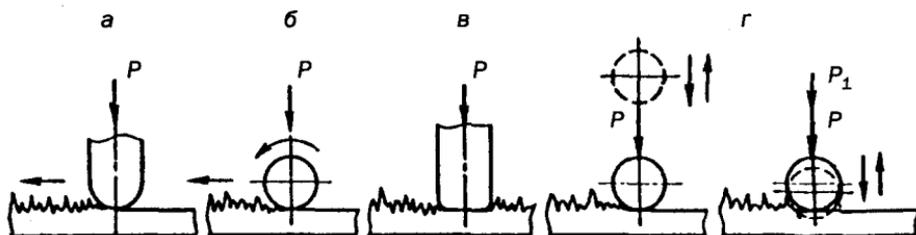


Рис. 4.2. Схемы контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью при различных методах ППД.

Обработка методами ППД может быть: сглаживающая — для уменьшения высоты микронеровностей поверхности; упрочняющая — для повышения поверхностной твердости и формирования остаточных сжимающих напряжений; точностная — для получения требуемых параметров точности; рельефная — для получения определенного микрорельефа поверхности; декоративная и т. п.

В зависимости от целей обработки методы статистического упрочнения могут быть рекомендованы для отделочно-упрочняющей обработки деталей, работающих в режимах жидкостного, полусухого и сухого трения; методы, в которых реализуются упрочняющие режимы обработки, рекомендуются для деталей, работающих в условиях контактно-силового нагружения (зубчатые колеса, валы, оси и т. п. детали); методы, в которых реализуются режимы, обеспечивающие сглаживание шероховатостей и одновременное упрочнение, могут быть рекомендованы для широкого круга деталей.

Динамические методы упрочнения (дробеметная, дробеструйная обработка, обработка в вибрирующих барабанах) наиболее эффективны для обработки деталей сложной конфигурации, работающих в условиях контактного силового нагружения.

Расширение области использования указанных методов может быть обеспечено путем КМО, например, ЭМН с ППД.

4.2. Механика контактного взаимодействия поверхностей

4.2.1. Взаимодействие поверхностей при контактировании. Фундаментальные исследования контактных взаимодействий поверхностей выполнены в работах Г. Герца, А. И. Динника, Н. М. Беляева, М. М. Саверина, И. Я. Штаермана, А. И. Лурье, С. Д. Пономарева, А. В. Степаненко, Е. Г. Ковалова, Е. М. Макушка, К. Л. Джонсона и других.

Теория контакта получила широкое применение в ряде практических задач как рациональная схема расчета, требующая уточнения конкретных случаев эксплуатации деталей машин.

При сжатии шара и плоскости из одного материала была получена круговая площадка радиусом

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \frac{1-\mu}{E} RP},$$

где μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости; R — радиус шара; P — нагрузка.

Приведем зависимости для полуосей эллипса площадки контакта a_s и b_s , сближения контактирующих тел a_c и максимального контактного напряжения q_0 :

$$a_s = n_a \sqrt[3]{\frac{3 JP}{2 K_\Sigma}}; \quad b_s = n_b \sqrt[3]{\frac{3 JP}{2 K_\Sigma}};$$

$$a_c = n_c \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} J^2 P^2 K_\Sigma}; \quad q_0 = n_q \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3 PK_\Sigma^2}{J^2}}; \quad J = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2},$$

где J — упругая постоянная контакта; K_Σ — сумма главных кривизн соприкасающихся тел; n_a , n_b , n_c , n_q — коэффициенты.

Полученные зависимости подтверждаются до тех пор, пока нагрузка, примененная к соприкасающимся телам, не приводит к образованию в зоне

контакта остаточных деформаций. Между тем контакт реальных поверхностей носит дискретный характер вследствие их волнистости и шероховатости. Поскольку идеальные условия контакта не соблюдаются, затрудняется получение необходимых решений с достаточной для практического использования точностью.

Для учета формы контактирующих тел и их взаимного расположения при поверхностном деформировании деталей целесообразно их рассматривать соприкасающимися в точке, на отрезке или по площадке (рис. 4.3).

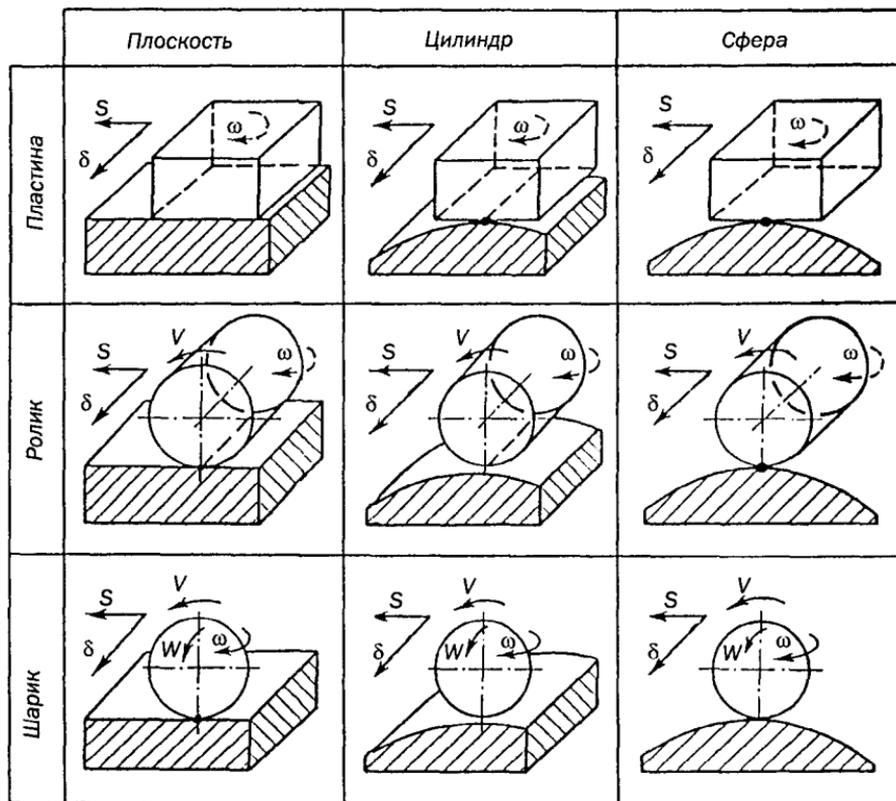


Рис. 4.3. Классификационная схема контактирующих тел при пластической обработке поверхностей деформирующими элементами с дополнительными степенями свободы: s , v — главные движения; δ , ω , W — дополнительные перемещения элемента.

Теоретические расчеты контактного взаимодействия тел возможны только при условии идеализированных моделей шероховатых поверхностей. Под шероховатой поверхностью в нашем случае понимаем ту, рельеф которой оценивается стандартными параметрами шероховатости ГОСТ 2789–85. При этом различают четыре площади касания: номинальную A_n , контурную A_c , фактическую A_f и физическую A_r . Номинальная площадь контакта A_n очерчена геометрическими размерами соприкасающихся тел. Контурная площадь A_c определяется площадками объемного смятия тел вследствие макрогеометрических отклонений поверхностей. Фактическая площадка A_f представляет собой суммы фактических участков соприкосновения тел, через которые передается давление.

Площадь A_f контакта составляет менее 1% от фактической площадки, и в этой области реализуется теоретическая прочность на поверхности. При контактировании менее твердой шероховатой поверхности с более твердой и гладкой, выступы шероховатой поверхности в процессе деформации расплющиваются. Под гладкой понимается поверхность, которая в расчетах принимается идеальной.

Изучение площади контакта A_f на субмикроскопическом уровне имеет важное значение при исследовании процессов структурной приспособляемости материалов при трении. Структурная приспособляемость реализуется в результате самоорганизации вторичных структур, имеющих аморфо-кристаллическое строение, которые образуются при взаимодействии поверхностей друг с другом и с окружающей средой. Это особенно важно для покрытий из самофлюсующихся материалов, склонных к аморфизации вследствие способности систем, содержащих B и Si , к переохлаждению при скоротечных процессах нанесения покрытий тонким слоем, что присуще электромагнитной наплавке с ППД.

Помимо структурной приспособляемости материала поверхности при трении происходит приспособляемость контртела, деформирующего поверхность, проявляющаяся в дополнительных перемещениях деформирующего элемента (рис. 4.3).

Рассмотренные номинальные и контурные площадки контактирования твердых тел произвольной формы позволят далее не рассматривать форму,

как обрабатываемой поверхности, так и деформирующих элементов (шарик, ролик и т. д.) при решении контактных задач. Вместе с тем показано, что фактические и физические площадки контакта зависят как от микрогеометрии контактирующих поверхностей (шероховатости поверхности, волнистости), так и от свойств (физико-механических, химических и др.) обрабатываемого материала.

4.2.2. Фактическая площадь касания поверхностей установленной шероховатости. Фактическая площадь касания составляет незначительную долю от номинальной. С увеличением нагрузки рост площади фактического контакта происходит в основном в результате увеличения числа пятен контакта при относительном постоянстве их размеров. При увеличении площади контакта на 90% величина отдельных пятен возрастает до 20%.

Ф. П. Боуденом и Д. Тейбором предложена формула для расчета фактической площади контакта

$$A_r = N / q_m ,$$

где N — номинальная нагрузка; q_m — давление, соответствующее переходу материала выступа в пластическое состояние.

Предложенная формула широко использовалась и другими исследователями. Так, например, А. Ю. Ишлинский показал, что

$$q_m = C\sigma_m \approx HB ,$$

где C — коэффициент стеснения, $C = 2,85$; σ_m — предел текучести наклепанного материала; HB — твердость материала по Бринеллю.

В. Н. Марочкин установил, что в зависимости от геометрических очертаний выступов C может принимать значения от 1,0 до 4,7 в пределах углов, имеющих место на реальных поверхностях. И. В. Крагельский получил для наклепанного материала $C = 9$, а Н. В. Демкин принял $C\sigma_m = HB$. С. Б. Айнбиндер экспериментально определил давление на контакте, равное примерно величине трех пределов текучести материала.

Рост пятна контакта при вдавливании сферы с увеличением нормального усилия протекает по трем механически различным стадиям: упругий

режим, при котором деформации обратимы и описываются решением Герца; переходный режим, начинающийся с зарождения пластической зоны, в течение которого коэффициент C растет с увеличением радиуса пятна контакта r' ; полностью пластичный режим, при котором коэффициент C остается постоянным.

К. Л. Джонсон нашел, что распределение давления по поверхности контакта при полностью пластическом режиме приблизительно равномерно. Так как распределение давления при упругом режиме имеет эллипсоидную форму, то давление может заметно изменяться с ростом нагрузки. При упругом режиме поля напряжений и деформаций известны, поэтому зона возникновения пластического течения, означающая начало переходного режима, может быть использована как граничное условие для последующей пластической деформации.

В упругом режиме из уравнений Герца

$$C = \frac{0,65}{1-\mu^2} \sqrt{\frac{h}{r'}} / \left(\frac{\sigma_m}{E} \right) = \frac{0,65}{1-\mu^2} \Omega,$$

где h — перемещение центра контакта относительно поверхности отсчета; r' — радиус пересечения поверхности контакта с поверхностью отсчета; Ω —

параметр отпечатка, $\Omega = \sqrt{\frac{h}{r'}} / \left(\frac{\sigma_m}{E} \right)$.

Коэффициент C линейно растет с ростом Ω в переходном режиме при $1,15 < \Omega < 27$ и становится постоянным ($C = 2,87$) при полностью пластическом режиме $\Omega > 27$ для различных материалов. Значение Ω в начале режима полной пластичности не зависит от способности материала к упругому деформированию и скорости деформационного упрочнения.

Коэффициент C далее использовался как коэффициент запаса при расчете рационального диапазона усилий деформирования P по допустимым напряжениям ($\sigma_0^+ = \sigma_m$ — предел текучести, контактное давление $q_m = C\sigma_m$), где C принимается равным 2, так как рассматривался переходный режим — зарождение пластической зоны.

И. В. Крагельский впервые использовал универсальную стержневую модель взаимодействия выступов. В случае обработки поверхности ЭМН более точны специальные модели — сферическая и эллипсоидная.

Значительный объем теоретических и экспериментальных исследований позволил выбрать оптимальные модели поверхности с заданной шероховатостью. Наиболее удовлетворительными моделями явились стержневая, клиновая, сферическая и эллипсоидная, причем наилучшие результаты дают сферическая и эллипсоидная модели выступов. Сферическая модель имеет преимущество, заключающееся в том, что сфера является частным случаем эллипсоида, а это упрощает расчетные зависимости. Сферическая модель используется для расчета всех параметров контакта шероховатых и волнистых поверхностей. Эллипсоидная модель, учитывающая характер распределения шероховатости поверхности, что особенно важно с точки зрения технологического обеспечения качества поверхностного слоя детали, положена в основу теоретических исследований.

Необходимо отметить, что при электромагнитной наплавке порошков эллипсоидная и особенно сферическая модель предпочтительнее, так как в этом случае специфика формирования наплавленной поверхности обеспечивает образование выступов именно такой формы.

4.2.3. Фактическая площадь касания и действительная нагрузка.

При силовых расчетах контактного взаимодействия поверхностей можно использовать параметры их опорных кривых, построенных по профилограммам, снятым в продольном и поперечном направлениях. Микрогеометрия поверхности определяется методом ее формирования и в значительной мере обуславливает ее износостойкость и другие эксплуатационные свойства. Для анализа поверхности необходимо изучение геометрических характеристик отдельных микронеровностей. В частности, для поверхностей, созданных методом порошковой наплавки, особенно важно исследование радиусов закругления выступов ρ , углов наклона профиля β и их распределения по высоте сечения (рис. 4.4).

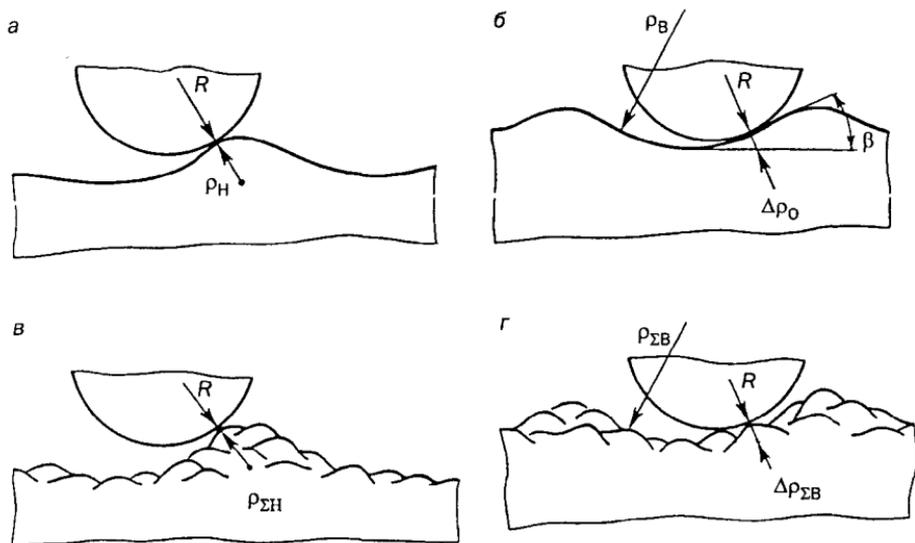


Рис. 4.4. Профиль наплавленного покрытия при поверхностной пластической обработке в случаях образования одной (а, б) или несколькими (в, г) частицами порошка выступов $\rho_H \ll R$ (а), $\rho_{\Sigma s} \ll R$ (б), и впадин $\rho_s \gg R$, $\Delta\rho_s \ll R$ (б), $\rho_{\Sigma s} \gg R$, $\Delta\rho_{\Sigma s} \ll R$ (г).

Опорная кривая поверхности является одной из важнейших характеристик шероховатой поверхности. Она строится на основании профилограмм поверхности.

Опорные кривые поверхности, построенные по профилограммам, снятым в одном направлении, достаточно хорошо характеризуют опорную площадь.

Опорные кривые поверхности могут быть описаны математически. П. Я. Дьяченко представил опорную кривую зависимостью

$$y = y_0 + kx^v,$$

где x — текущее значение ординаты; y_0 — протяженность материала на некотором уровне; k и v — коэффициенты.

М. А. Бабичев и Н. П. Гнусин представляли опорную кривую одной из ветвей графически выраженного нормального закона распределения Гаусса

$$y = y_0 \exp(-k^2 x^2).$$

И. В. Крагельский описал кривую опорной поверхности для стержневой модели интегралом вероятности Гаусса

$$n = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) dx,$$

где n — число стержней-выступов; \bar{x} — наиболее вероятная высота стержней-выступов; σ — среднеквадратичное отклонение.

Н. Б. Демкин представил опорную кривую как

$$\eta = \exp(C - C/\varepsilon),$$

где $\eta = A_r/A_a$ — относительная площадь касания; $\varepsilon = r/h$ — относительное сближение.

Фактическая площадь контакта A_r составляет незначительную часть от номинальной A_a . В этой связи наибольший интерес представляют начальные участки опорных кривых поверхностей, которые описываются следующей степенной зависимостью:

$$t_p = b(p_c/R_{max})^\nu = b\varepsilon^\nu,$$

где t_p — относительная опорная длина профиля; p_c — уровень сечения профиля от линии выступов; R_{max} — расстояние между линией выступов и линией впадин профиля; ε — относительное сближение контактирующих поверхностей; b, ν — параметры опорной кривой поверхности, определяющиеся путем построения опорной кривой поверхности в логарифмических координатах.

По данным Н. Б. Демкина, параметры b, ν имеют следующие значения: при строгании, точении, фрезеровании $b = 1 - 2$, $\nu = 1,2 - 2$; при шлифовании $b = 1,5 - 4$, $\nu = 1,6 - 3$; при полировании $b = 3 - 10$, $\nu = 2 - 3$.

При ППД обрабатываемых поверхностей, имеющих низкую шероховатость поверхности, выступы последней деформируются в основном упруго, грубые поверхности — преимущественно пластически, а поверхности со средними величинами шероховатости — упруго-пластически. При повторных нагружениях без увеличения давления имеет место только упругая деформация.

Для приближенных расчетов характеристик контакта разработаны упрощенные формулы, удобные для инженерных расчетов. Среднее значение фактического давления

$$q_r = \frac{N}{A_r} = (K_3 p)^{\frac{v}{v+w}} \left(\frac{R_{cp}}{r} \right)^{\frac{vw}{v+w}} \left(\frac{N}{\alpha t_{cp} A_c} \right)^{\frac{vw}{v+w}},$$

где K_3 — коэффициент, определяемый в зависимости от v ; w , p и α — коэффициенты, характеризующие деформационные свойства материала: при угловой деформации $w = 0,5$, $p = 0,43/l$, $\alpha = 0,5$; при пластической с упрочнением $w = 0 - 0,5$, $p = 2^w H_y$, $\alpha = 0 - 0,5$; при упругой деформации $w = 0$, $p = H_\mu$, $\alpha = 1$; H_y — максимальная твердость по Майеру; H_μ — микротвердость поверхности; R_{cp} — расстояние от линии вершин до средней линии, $R_{cp} = 3R_a$; t_{cp} — относительная опорная длина профиля на уровне средней линии.

При упругом контакте фактическое давление

$$q_r = K_q I^{m_1 - 1} \left(\frac{Ra}{r} \right)^{0,43} q_c^{m_1},$$

где $K_q = 0,1$ и $m_1 = 0,14$ для контакта двух шероховатых поверхностей; q_c — контурное давление.

Абсолютное сближение a , средняя площадь пятна контакта A , объем зазора между контактирующими поверхностями V , равны:

$$a = K_a Ra (q_c / q_r)^{m_2}; \quad A = K_r m_2 r_2 Ra (q_c / q_r)^{m_2}; \quad V_3 = (R_{p_1} + R_{p_2} - a) A_c,$$

где $K_a = 3,3$ и $m_2 = 0,33$ для контакта двух шероховатых поверхностей; $K_a = 3,6$ и $m_2 = 0,5$ для контакта шероховатой поверхности с гладкой; $K_r = 11$ для упругого контакта, $K_r = 21$ для пластического контакта.

При большой нагрузке пятна контакта на вершинах могут располагаться очень близко, и начинается взаимное влияние пластических деформаций. Это приводит к увеличению фактического давления в контакте, и при $q_c > 0,25$ НВ, $q_r \approx q_c (1 + \text{НВ}/\text{Н}\mu)$ фактическое давление на контакте может в два раза превысить твердость.

Приведенные формулы предназначены для условий статического нагружения. При переходе от покоя к движению происходит изменение напряженного состояния контактирующих выступов и перераспределение площадей контакта. Применительно к электромагнитной наплавке с ППД, превышение в два раза фактического давления на контакте, твердости или начального давления дает возможность при расчете требуемой нагрузки рекомендовать в качестве коэффициента запаса $C \approx 2$, так как $q_m \approx HB$.

4.2.4. Одновременное действие нормальных и касательных нагрузок при изменении положения поверхностей. Решение контактных задач при одновременном действии нормальных и касательных сил, которые часто возникают при изучении процессов формирования поверхности, чрезвычайно сложно, и только в простейших случаях возможно получение приближенных решений.

Увеличение площади упругости контакта под влиянием касательных сил при средних значениях коэффициента трения не превышает 5%. Изменение коэффициента трения в пределах 0,2—0,4 при контакте цилиндра с плоскостью сохраняется полуширина площади контакта под действием сил трения.

Увеличение сближения при сдвиге вызвано перераспределением площади контакта. При переходе от покоя к скольжению сближение составляет примерно 0,5 мкм, затем оно быстро убывает и стабилизируется по установившейся величине.

Установлено, что величина сближения постепенно уменьшается вследствие приработки поверхностей и наклепа поверхностных слоев, а увеличение фактической площади контакта не превышает 9%.

Замеры изменения сближения в статическом состоянии и при скольжении тел показали, что фактическая площадь касания при движении незначительно отличается от площади касания в неподвижном состоянии.

Было показано, что при средних значениях коэффициентов трения и установившейся микрогеометрии поверхности касательные силы изменяют фактическую площадь контакта между контактирующими телами.

При переходе от статики к движению в начале скольжения площадь фактического контакта перераспределяется, так как любой выступ опирается на деформированный материал только фронтальной по направлению движения частью поверхности. Резкое уменьшение площади контакта при сдвиге вызывает увеличение сближения между контактирующими телами. Приведем следующие соотношения между сближением в статике и при скольжении:

- для единичного выступа

$$a_0 = a2\sqrt{1 + f^2} ;$$

- для контакта шероховатой поверхности с гладкой

$$a_0 = a\left(2\sqrt{1 + f^2}\right)^{1/\nu} ;$$

- для контакта двух шероховатых поверхностей

$$a_0 = a\left(2\sqrt{1 + f^2}\right)^{1/(\nu_1 + \nu_2)} ,$$

где a и a_0 — абсолютные сближения в статике и динамике соответственно; f — коэффициент внешнего трения; ν_1 и ν_2 — параметры степенной аппроксимации кривых опорных поверхностей контактирующих тел.

Увеличение сближения в момент сдвига сопровождается перемещением материалов твердых тел в тангенциальном направлении и увеличением силы трения от нуля до максимального значения, равного силе скольжения. Расстояние, проходимое твердым телом в тангенциальном направлении, является контактным предварительным смещением. Сближение и предварительное смещение увеличиваются с ростом нагрузки и пластичности материала. Пластичность материала, его разупрочнение для большинства металлов и сплавов увеличиваются особенно быстро при нагревании с 300 до 400°С.

При переходе от покоя к скольжению движущееся тело выталкивается к поверхности. Это объясняется двумя факторами: опережающим деформационным упрочнением материала перед деформирующим телом и течением материала в навалы, что приводит к возникновению силы трения, выталкивающей движущееся тело. Так при переходе от покоя к скольжению движущееся

тело всплывает, а после остановки заглубляется, но не достигает первоначальной величины заглубления. Это полностью объясняется двумя указанными факторами, так как в момент остановки прекращается течение материала и образование навалов. Если бы материал под выступами тела не упрочнялся и не было бы течения материала, то при тангенциальном сдвиге внедренного тела его площадь касания уменьшилась бы примерно вдвое, что привело бы к резкому углублению выступов в материале.

Управлять этими факторами в процессах формирования поверхности можно, разупрочняя обрабатываемый материал предварительным нагревом и направляя течение материала посредством дополнительных перемещений деформирующего тела.

Контактное взаимодействие нередко сопровождается возникновением трещин под действием как тепловых, так и деформационных нагрузок. Особенно часто трещины появляются при контактировании слоистых сред со сложным микрорельефом поверхности.

При решении контактных задач с учетом трения важны не только текущие значения нормальных и сдвиговых нагрузок, но последовательность и методики нагружения, т. е. технологическая и эксплуатационная наследственность поверхностных слоев детали.

4.3. Кинематика и динамика деформирующего элемента

4.3.1. Качение и вращение деформирующего элемента. При комбинированном методе ЭМН с ППД деформирующий элемент, обладающий множеством степеней свободы (рис. 4.3), при взаимодействии с поверхностью наплавки (рис. 4.4) получает стохастические импульсы от столкновений с микровыступами деформируемой поверхности, в результате которых элемент помимо движения подачи приобретает вращение.

Допустим, что деформирующий элемент жестко закреплен в точке O , которая лежит на его оси симметрии, но не совпадает с центром масс (рис. 4.5). Так как деформирующий элемент находится в потенциальном поле силы тяжести $m\vec{g}$ и силы прижима P , то он может рассматриваться как симметричный неуравновешенный волчок.

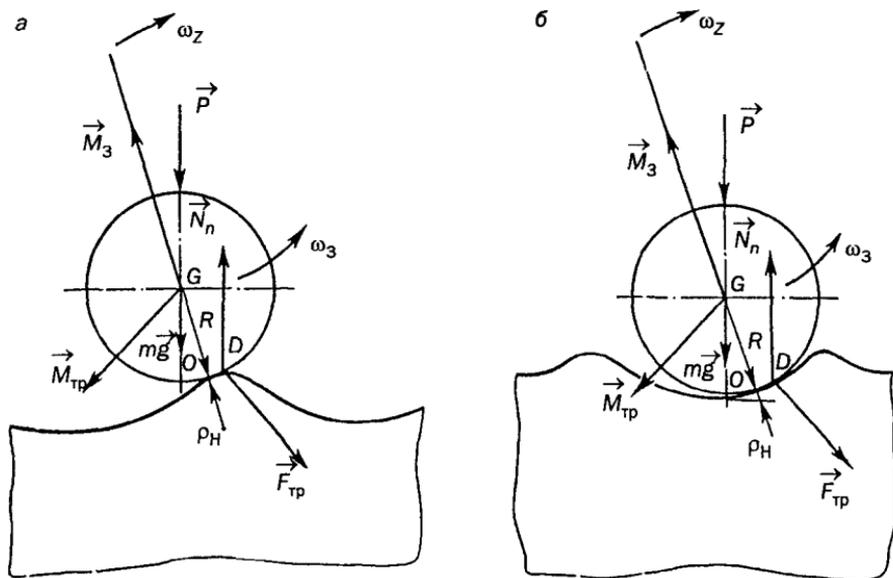


Рис. 4.5. Схема расчета динамики деформирующего элемента в процессе обработки наплавленного покрытия.

Если ввести координаты таким образом, чтобы среди них были углы вращения вокруг вертикальной оси и вокруг оси тела, то эти циклические координаты сведут задачу с тремя степенями свободы к задаче с одной степенью свободы.

Введем следующие обозначения (рис. 4.6): $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ — орты правой декартовой неподвижной системы координат в неподвижной точке 0; $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ — орты связанные с телом правой подвижной системы координат, направленные по осям инерции тела в точке 0; $I_1 = I_2 \neq I_3$ — моменты инерции тела в точке 0; \vec{e}_N — орт оси (\vec{e}_2, \vec{e}_3) , называемый линией узлов.

Чтобы перевести неподвижный репер $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ в подвижный $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, необходимо выполнить три поворота: на угол φ вокруг оси \vec{e}_z , при этом \vec{e}_z остается на месте, а \vec{e}_x переходит в \vec{e}_N ; на угол θ вокруг оси \vec{e}_N , при этом \vec{e}_z переходит в \vec{e}_3 , а \vec{e}_N остается на месте; на угол ψ вокруг оси \vec{e}_3 , при этом \vec{e}_N переходит в \vec{e}_1 , а \vec{e}_3 остается на месте.

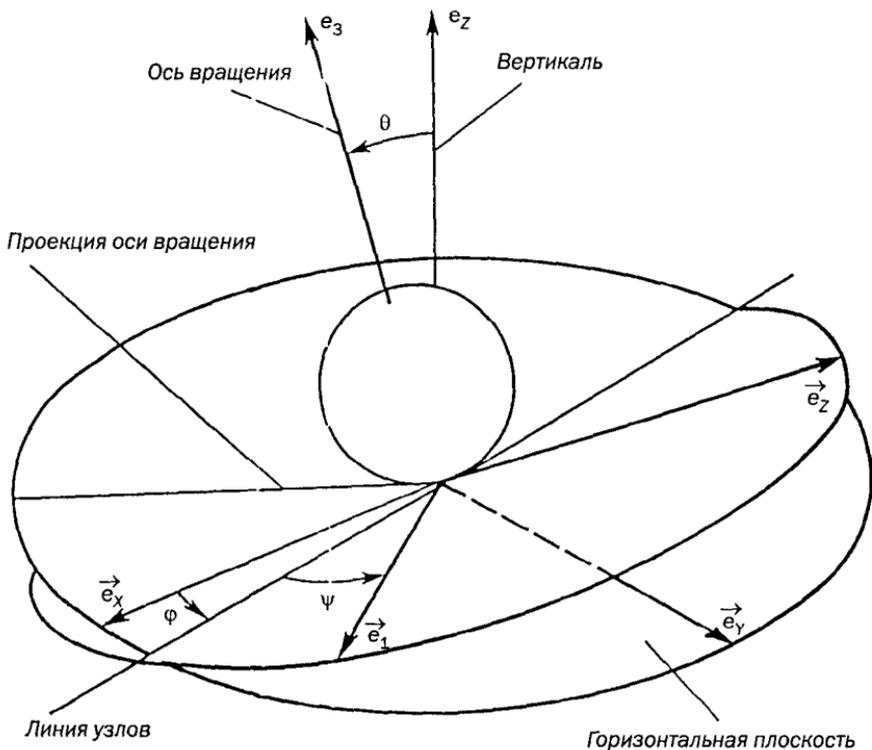


Рис. 4.6. Система координат, используемая при вращениях деформирующего элемента: $e_1, e_2, e_3, e_x, e_y, e_z$ — единичные орты; ψ — угол собственного вращения; φ — угол прецессии; θ — угол нутации.

В результате всех трех вращений \vec{e}_x переходит в \vec{e}_1 , а \vec{e}_z в \vec{e}_3 , поэтому \vec{e}_y переходит в \vec{e}_2 . Углы φ, ψ, θ изменяются в пределах $0 < \varphi < 2\pi, 0 < \psi < 2\pi, 0 < \theta < \pi$.

Потенциальная энергия тела равна

$$U = \iiint z g dm = mgz_c = mgR \cos \theta,$$

где z_c — высота центра тяжести над 0; g — ускорение потенциального поля; R — расстояние от центра тяжести до точки касания с поверхностью.

Если принять $\varphi = \psi = 0$, то угловая скорость выразится

$$\vec{\omega} = w_1 \vec{e}_1 + w_2 \vec{e}_2 + w_3 \vec{e}_3 = \dot{\theta} \vec{e}_1 + (\varphi \sin \dot{\theta}) \vec{e}_2 + (\psi + \varphi \cos \dot{\theta}) \vec{e}_3.$$

Поскольку $T = \frac{1}{2}(I_1 w_1^2 + I_2 w_2^2 + I_3 w_3^2)$, кинетическая энергия при $\varphi = \psi = 0$ задается формулой

$$T = \frac{I_1}{2}(\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2 \sin^2 \theta) + \frac{I_3}{2}(\dot{\psi} + \dot{\phi} \cos \theta)^2,$$

но, так как она не может зависеть от циклических координат ϕ и ψ , то не меняющим T выбором начала отсчета ϕ и ψ мы всегда можем сделать $\phi = \psi = 0$. Полученная формула для кинетической энергии справедлива при всех углах ϕ и ψ .

Получаем, таким образом, функцию Лагранжа

$$L = \frac{I_1}{2}(\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2 \sin^2 \theta) + \frac{I_3}{2}(\dot{\psi} + \dot{\phi} \cos \theta)^2 - mgR \cos \theta.$$

Циклическим координатам ϕ и ψ соответствуют

$$\frac{\partial L}{\partial \phi} = M_z = \phi(I_1 \sin^2 \theta + I_3 \cos^2 \theta) + \psi I_3 \cos \theta;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \psi} = M_3 = \phi I_3 \cos \theta + \psi I_3,$$

где M_z и M_3 — проекции кинетического момента на вертикаль и ось вращения тела.

Выразим ϕ и ψ через M_z и M_3 . Получим полную энергию системы в виде

$$E = \frac{I_1}{2}\dot{\theta}^2 + \frac{M_3}{2I_3} + mgR \cos \theta + \frac{(M_z - M_3 \cos \theta)^2}{2I_1 \sin^2 \theta} = E'(\theta) + \frac{M_3^2}{2I_3},$$

где $\frac{M_3^2}{2I_3}$ — постоянный член, не влияющий на уравнение для θ .

$$\dot{\phi} = \frac{M_z - M_3 \cos \theta}{I_1 \sin^2 \theta}; \quad \dot{\psi} = \frac{M_3}{I_3} - \cos \theta \dot{\phi}.$$

Чтобы изучить полученную одномерную систему, удобно сделать замну $\cos \theta = u$.

Обозначая $\frac{M_z}{I_1} = a$, $\frac{M_3}{I_1} = b$, $\frac{2E'}{I_1} = \alpha$, $\frac{2mgR}{I_1} = \beta$ получаем закон сохранения энергии E' в виде

$$\dot{u}^2 = (\alpha - \beta u)(1 - u)^2 - (a - bu)^2 = f(u)$$

и законы изменения φ и ψ

$$\dot{\varphi} = \frac{a - bu}{1 - u^2}, \quad \dot{\psi} = \frac{I_1}{I_3} b - u\dot{\varphi}.$$

Заметим, что $f(u)$ — полином третьей степени; $f(\pm\infty) = \pm\infty$; $f(\pm 1) = -(a \pm b)^2 < 0$, если только $a \neq \pm b$. Действительному же движению отвечают только такие постоянные a , b , α , β , при которых $f(u) = (\dot{u})^2 \geq 0$, при некоторых $-1 \leq u \leq 1$. Следовательно, $f(u)$ имеет два вещественных корня u_1 , u_2 на отрезке $-1 \leq u \leq 1$ и один при $u > 1$ (рис. 4.7, а).

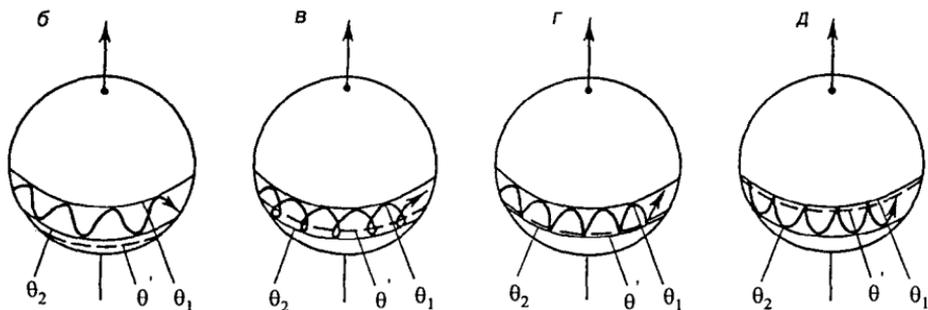
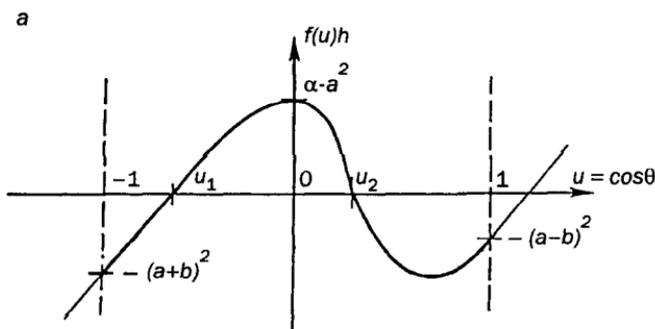


Рис. 4.7. График функции $f(\cos \theta)$ (а) и след оси вращения на контурной площадке касания деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью (б—д).

В результате этого наклон оси вращения тела θ меняется периодически между двумя предельными значениями θ_1 и θ_2 (рис. 4.7, б—д). При этом изменение азимута оси определяется уравнением

$$\dot{\phi} = b \frac{(a/b - u)}{1 - u^2}.$$

Движение оси вращения тела имеет качественно различный характер в случаях: $u' > u_2$; $u_1 < u' < u_2$; $u' = u_2$; $u' = u_1$, где

$$u' = a/b = M_2/M_3.$$

В первом случае $u_2 < u'$, т. е. $\dot{\phi} > 0$ при всех u в интервале $u_1 \leq u \leq u_2$. Направление оси колеблется между θ_1 и θ_2 , т. е. перемещается, совершает движение в одну и ту же сторону положительного направления угла ϕ и чертит кривую типа синусоиды (рис. 4.7, б).

Во втором случае $u_1 \leq u \leq u_2$; $\dot{\phi} > 0$ при $u = u_1$ и $\dot{\phi} < 0$ при $u = u_2$, следовательно, движение носит петлеобразный характер (рис. 4.7, в).

В третьем случае $\dot{\phi}_2 = 0$ при $u_2 = u'$ движение оси чертит кривую с остриями (рис. 4.7, г). Движение (рис. 4.7, д) будет иметь место, если в начальный момент тело раскручено относительно своей оси симметрии в фиксированном положении $\phi = \phi_0$, причем $\dot{\phi}_0 = 0$, $\theta = \theta_0 = \theta_1$, $\dot{\theta}_0 = 0$. При этом $E' = mgR \cos \theta$. При остальных значениях $\theta < \theta_0$ скорости $\dot{\theta}$ и $\dot{\phi}$ не могут одновременно равняться нулю.

Таким образом, движения деформирующего элемента определяются проекциями его кинетического момента M_3 , M_z на ось вращения и перпендикуляр к обрабатываемой поверхности, которые согласно моментам инерции I_3 и I_z зависят от формы и размеров элемента и появляются, согласно угловым скоростям w_3 и w_z в результате взаимодействия с деформируемой поверхностью.

Следовательно, движения и траектория деформирующего элемента определенной формы, влияющей на моменты инерции I_3 и I_z , с дополнительными степенями свободы движений, описываемыми угловыми скоростями w_3 и w_z , зависят от стохастических импульсов, изменяющих кинетические моменты M_3 и M_z в результате столкновений с микровыступами деформируемой

поверхности в процессе ЭМН с ППД, и определяются характером формы и размерами микрорельефа наплавленной поверхности.

4.3.2. Колебания вращающегося деформирующего элемента. Устойчивость дополнительного вращения шарика обеспечивает регулярность его траектории и, следовательно, регулярность, форму и высоту неровностей формируемой поверхности.

Изучая устойчивость вертикально вращающегося деформирующего элемента и его движения при высокой скорости вращения, рассмотрим случай, при котором ось вращения вертикальна $\theta = 0$, а угловая скорость постоянная. Тогда проекции кинетического момента

$$M_z = M_3 = I_3 \omega_3.$$

Преобразуем зависимость эффективной потенциальной энергии системы

$$u_{эф} = E - \frac{M_3^2}{2I_3} - \frac{I_1}{2} \theta^2 = \frac{(M_z - M_3 \cos \theta)^2}{2I_1 \sin^2 \theta} + mgR \cos \theta$$

в ряд Маклорена по степеням и получим

$$u_{эф} = \frac{I_3^2 \omega_3^2 \theta^4}{2I_1 \theta^2} - mgR \theta^2 / 2 + \dots = \left(\frac{I_3^2 \omega_3^2}{BI_1} - \frac{mgR}{2} \right) \theta^2 + \dots A \theta^2 + \dots$$

Если $A > 0$, то положение равновесия $\theta = 0$ одномерной системы устойчиво, а если $A < 0$, то неустойчиво. В этом случае условие устойчивости имеет вид

$$\omega_3 > 2\sqrt{mgRI_1 / I_3}.$$

При этом условии ось вращения устойчива относительно возмущений, которые меняют значения M_z и M_3 , а не только θ .

Согласно условию устойчивости, скорость вращения должна быть достаточно велика, что не имеет места при ЭМН с ППД. Кроме того, трение и его возрастание, например, при повышении температуры поверхности, стремятся снизить скорость вращения. В этих условиях устойчивость снижается или исчезает и теряется.

Рассмотрим быстрое вращение оси деформирующего элемента, когда кинетическая энергия вращения $I_3 w_3^2/2$ сопоставима с потенциальной mgR и вместо условия $w \rightarrow \infty$ можно использовать $g \rightarrow 0$.

Если в начальный момент ось вращения неподвижна $\dot{\phi} = \dot{\theta} = 0$ и тело быстро вращается вокруг своей оси w_3 , наклоненной к вертикали под углом θ_0 (рис. 4.7, д), то существует положение оси, соответствующее минимуму эффективной потенциальной энергии $u_{\text{эф}}$.

Для нахождения положения минимума θ_g эффективной потенциальной энергии перейдем к случаю, когда начальная угловая скорость w_3 фиксирована, а ускорение $g \rightarrow 0$ (здесь $f(w_3) \sim g(w_3)$, если $\lim_{w_3 \rightarrow \infty} fg$). Положим $\theta = \theta_0 + x$; $\cos \theta = \cos \theta_0 - x \sin \theta_0 + \dots$, тогда получим тейлоровское разложение по x .

$$u_{\text{эф}/g=0} = \frac{I_3^2 w_3^2}{2I} x^2 + \dots;$$

$$mgR \cos \theta = mgR \cos \theta_0 - x mgR \sin \theta_0 + \dots$$

Минимум эффективной потенциальной энергии достигается при

$$x_g = \frac{I_1 m R \sin \theta_0}{I_3^2 w_3^2} g + \dots$$

и угле наклона оси вращения

$$\theta_g = \theta_0 + x_g = \theta_0 + \frac{I_1 m R \sin \theta_0}{I_3^2 w_3^2} g + \dots$$

Итак, для быстро вращающегося деформирующего элемента наклон оси вращения θ будет колебаться около θ_g , но в начальный момент $\theta = \theta_0$, а $\dot{\theta} = 0$ с амплитудой колебаний нутации, асимптотически стремящейся к $a_{\text{нут}}$.

$$a_{\text{нут}} = \frac{I_1 m R \sin \theta_c}{I_3^2 w_3^2} g.$$

Теперь найдем азимутальное движение оси.

Из $\dot{\varphi} = (M_z - M_3 \cos \theta)/(I_1 \sin \theta)$ при $M_z = M_3 \cos \theta_0$, $\theta = \theta_0 + x$ находим $M_z - M_3 \cos \theta = M_3 x \sin \theta_0 + \dots$, поэтому $\dot{\varphi} = \frac{M_3}{I_1 \sin \theta_0} x + \dots$. Но x колеблется гармонически от 0 до $2x_g$, поэтому среднее за период нутации значение скорости прецессии равно

$$\bar{\varphi} = \frac{M_3}{I_1 \sin \theta_0} x_g = \frac{mgR}{I_3 \omega_3}.$$

Аналогично среднее за период нутации значение скорости собственного вращения тела

$$\bar{\dot{\psi}} = \frac{M_3}{I_3} - (\cos \theta_0 - x_g \sin \theta_0) \bar{\dot{\varphi}} = \omega_3 - \frac{mgR}{I_3 \omega_3} \cos \theta_0 + \frac{I_1 m^2 R^2 g^2 \sin \theta_0}{I_3^3 \omega_3^3}$$

асимптотически стремится к

$$\bar{\dot{\psi}} = \omega_3 - \frac{mgR}{I_3 \omega_3} \cos \theta_0.$$

Собственное вращение, прецессия и нутация — движения, описываемые углами Эйлера соответственно ψ , φ и θ .

Таким образом, помимо скорости нутации $\dot{\theta}$, колебания оси которой описывают траекторию движения (рис. 4.7), получены средние скорости прецессии и собственного вращения $\bar{\dot{\varphi}}$ и $\bar{\dot{\psi}}$, описывающие кинематику деформирующего элемента при ЭМН с ППД.

4.3.3. Движения деформирующего элемента по шероховатой поверхности. Рассмотрим влияние силы трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ (рис. 4.5) на движение деформирующего элемента. Одним из эффектов воздействия силы трения является то, что эта сила может приблизить ось движения тела к вертикали.

Допустим, что деформирующий элемент, вращающийся вокруг своей оси без начальной скорости центра масс, расположен на поверхности, тогда его ось вращения составляет с вертикалью угол θ .

Кинетический момент $\vec{M}_3 = I_3 \vec{\omega}_3$ тела относительно центра масс в начальный момент направлен вдоль оси вращения. Деформирующий элемент контактирует с опорной площадкой в точке D (рис. 4.5). Сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ направлена в сторону, противоположную скорости точки D . Момент $\vec{M}_{\text{тр}}$ силы

трения относительно центра масс направлен перпендикулярно плоскости, проходящей через центр масс G и вектор $\vec{F}_{\text{тр}}$. Вектор $\vec{M}_{\text{тр}}$ можно представить в виде суммы $\vec{M}_1 + \vec{M}_2$, где вектор \vec{M}_1 перпендикулярен \vec{M}_3 , а вектор \vec{M}_2 коллинеарен вектору \vec{M}_3 и в рассматриваемой ситуации направлен противоположно \vec{M}_3 . По теореме об изменении кинетического момента скорость конца вектора \vec{M}_3 равна $\vec{M}_{\text{тр}}$. Отсюда следует, что вектор \vec{M}_3 , уменьшаясь по величине вследствие наличия составляющей \vec{M}_2 момента силы трения, стремится занять вертикальное положение в результате присутствия составляющей \vec{M}_1 момента силы трения.

Таким образом, вектор \vec{M}_3 , а вместе с ним и ось вращения тела под влиянием трения стремится к вертикали. Если действие трения будет достаточно продолжительным, то ось вращения может в конце концов занять вертикальное положение и останется в этом положении неподвижной. Нагрев поверхности ускоряет процесс поднятия деформирующего элемента на вершину выступа, так как с повышением температуры поверхности растет коэффициент трения.

Рассмотрим движения деформирующего элемента при наличии трения по протяженной плоской шероховатой поверхности. Введем две системы координат: неподвижную $Oxyz$ с вертикальной осью Oz и началом O , совпадающим с произвольной точкой опорной плоскости, и поступательно движущуюся $Gx'yz'$ с началом в центре масс тела G и осями, параллельными соответствующим осям неподвижной системы координат (рис. 4.8, а). Две системы координат вводим потому, что от прежней, связанной с точкой касания деформирующего элемента с поверхностью, в которой описывали вращение, переходим к системе, связанной с центром тяжести деформирующего элемента, в которой удобно описывать перемещения элемента относительно обрабатываемой поверхности.

Реакцию поверхности \vec{R}_n представим в виде суммы двух сил: $\vec{R}_n = \vec{N}_n + \vec{F}_{\text{тр}}$, где \vec{N}_n — нормальная реакция поверхности, $\vec{F}_{\text{тр}}$ — сила трения. Если $\vec{\omega}$ — угловая скорость тела, а v_g — скорость центра масс, то скорость \vec{v}_D точки D тела, которой тело касается поверхности, определяется по формуле

$$\vec{v}_D = \vec{v}_G + \vec{\omega} \cdot \vec{GD}.$$

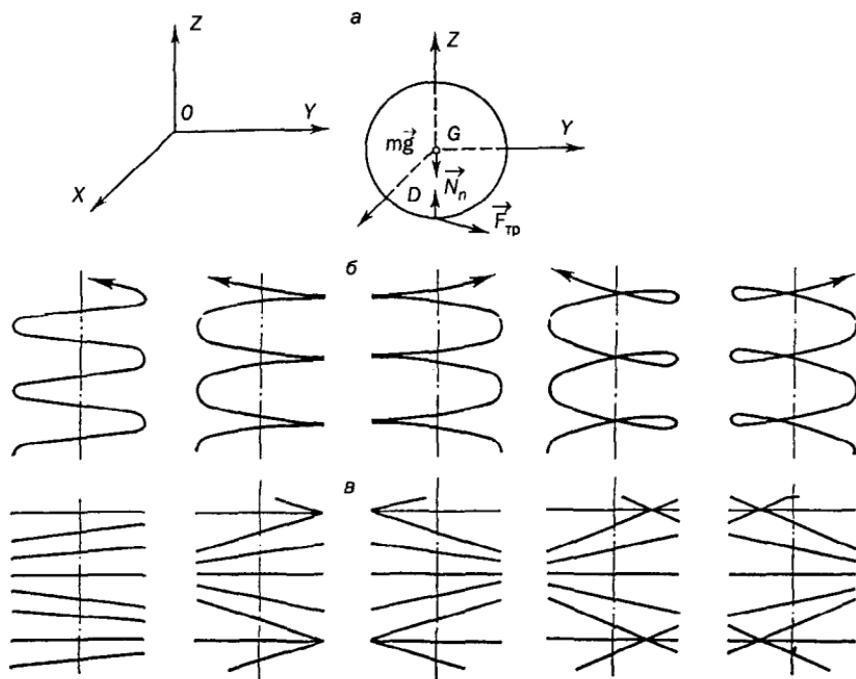


Рис. 4.8. Система координат, используемая при движении деформирующего элемента (а); траектории точек (б) и признаков (в) касания элемента на обрабатываемой поверхности.

Силу трения скольжения представим в виде

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -kN_n \vec{U}_D,$$

где k — коэффициент трения; \vec{U}_D — единичный вектор, направленный вдоль скорости точки D $\vec{v}_D = v_D \vec{U}_D$.

Из теоремы движения центра инерции имеем

$$m d\vec{v}_D / dt = m\vec{g} + \vec{R}_n.$$

Кинетический момент деформирующего элемента относительно центра масс $\vec{M}_G = I\vec{\omega}$. Теорема об изменении кинетического момента для движения относительно центра масс описывается уравнением

$$I d\vec{\omega} / dt = \vec{G}D \cdot \vec{R}_n.$$

Полученные уравнения в скалярном виде запишутся

$$m d^2 x_G / dt^2 = F_{\text{тр}x}; \quad m d^2 I_G / dt^2 = F_{\text{тр}y}; \quad m d^2 z_G / dt^2 = -mg + N_n = 0;$$

$$I dw_x / dt = RF_{\text{тр}y}; \quad I dw_y / dt = -RF_{\text{тр}x}; \quad dw_z / dt = 0,$$

где x_G, y_G, z_G — координаты центра масс в системе $Oxyz$; $F_{\text{тр}x}, F_{\text{тр}y}$ — проекции силы трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ на оси Ox и Oy ; w_x, w_y, w_z — проекции вектора на оси Gx, Gy, Gz .

Проекции сил на вертикаль показывают, что нормальная реакция поверхности вне зависимости от того, скользит тела по поверхности или нет, равна силам потенциального поля таким как вес, прижим и др. Проекция угловой скорости на вертикаль при этом остается постоянной.

Пусть в начальный момент имеет место скольжение, т. е. $v_D = 0$. Так как $N_n = mg$, то получаем, что при наличии скольжения сила трения постоянна по величине $F_{\text{тр}} = kmg$. Для того, чтобы показать, что она постоянна и по направлению, продифференцируем по времени зависимость для скорости v_D и воспользуемся уравнениями в векторной форме, а также равенствами $\vec{R}_n = mg + \vec{F}_{\text{тр}}$, $\vec{G}D = \vec{g}R/g$. Получим

$$\frac{dv_D}{dt} = \left(\frac{R^2}{I} + \frac{1}{m} \right) \vec{F}_{\text{тр}}.$$

Представив $\vec{v}_D = v_D \vec{U}_D$, а $\vec{F}_{\text{тр}} = -kN_n \vec{U}_D$, получим

$$\frac{dv_D}{dt} \vec{U}_D + v_D \frac{d\vec{U}_D}{dt} = - \left(1 + \frac{mR^2}{I} \right) kg \vec{U}_D.$$

Так как \vec{U}_D — единичный вектор, то $d\vec{U}_D/dt$ перпендикулярен \vec{U}_D . Следовательно,

$$\frac{d\vec{U}_D}{dt} = 0, \quad \frac{dv_D}{dt} = - \left(1 + \frac{mR^2}{I} \right) kg.$$

Значит, вектор \vec{U}_D имеет постоянное направление, и, следовательно, сила трения постоянна

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -kmg \vec{U}_D.$$

Таким образом видно, что сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ не зависит от скорости \vec{U}_D и поэтому остается неизменной при постоянных значениях прижима (ускорение \vec{g}) и коэффициента трения k . Вместе с тем можно отметить, что даже при постоянном прижме могут происходить изменения $F_{\text{тр}}$ при изменении k , наличии смазки, росте температуры контакта и др. факторах.

Величина скорости точки D изменяется во времени по закону

$$v_D(t) = v_D(0) - \left(1 + \frac{mR^2}{I}\right) kgt.$$

Обозначим через δ постоянный угол, который составляет скорость точки D с осью 0_x . Из системы скалярных уравнений получаем

$$x_G(t) = x_G(0) + \dot{x}_G(0)t - \frac{1}{2}kg \cos \delta t^2;$$

$$y_G(t) = y_G(0) + \dot{y}_G(0)t - \frac{1}{2}kg \sin \delta t^2;$$

$$w_x(t) = w_x(0) - \frac{R}{I}kmg \sin \delta t;$$

$$w_y(t) = w_y(0) - \frac{R}{I}kmg \cos \delta t.$$

Следовательно, если в начальный момент скорость центра масс и скорость точки касания не коллинеарны, т. е. сонаправлены или противоположно направлены, то на стадии движется со скольжением при зафиксированном прямолинейном движении центра масс точка касания деформирующего элемента с поверхностью движения по параболе. Такое движение происходит до момента $t_c = [v_D(0)I / kg(I + mR^2)]$, когда $\vec{v}_D = 0$, скольжение прекращается и начинается стадия качения деформирующего элемента с вращением.

Показано, что качение и вращение деформирующего элемента на шероховатой поверхности происходит по одной из траекторий (рис. 4.8, б, в) в зависимости от коэффициента трения k между деформирующим элементом и обрабатываемой поверхностью, а также с учетом его изменений, которые связаны с изменениями температуры, влияют на коэффициент трения k и, таким образом определяют траекторию движения деформирующего элемента.

4.3.4. Устойчивость движений деформирующего элемента. Исследуем и рассмотрим условия устойчивости вращательных движений деформирующего элемента, закрепленного в центре масс и находящегося под действием силы тяжести и усилия закрепления вокруг главных осей инерции. Главный момент внешних сил относительно закрепленной точки в том случае равен нулю.

Пусть оси координат G_x, G_y, G_z , скрепленные с движущимся телом (рис. 4.8, а), являются главными осями инерции для его неподвижной точки G . Динамические уравнения Эйлера для такого тела имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} I_x \dot{w}_x + (I_z - I_y) w_z w_y &= 0; \\ I_y \dot{w}_y + (I_x - I_z) w_x w_z &= 0; \\ I_z \dot{w}_z + (I_y - I_x) w_y w_x &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Если $w_x = w_y = 0$; $w_z = w_0 = \text{const}$, то они удовлетворяют уравнениям и являются решениями системы уравнений. Допустим, что деформируемому элементу сообщены малые возмущения в виде малых начальных угловых скоростей w_{0x} и w_{0y} вокруг осей G_x и G_y . Если величины w_x и w_y остаются малыми с течением времени, то вращение вокруг главной оси инерции считают устойчивым. Если эти величины неограниченно возрастают, то вращение вокруг главной оси инерции неустойчиво.

Предположив, что вращение вокруг оси G_z устойчиво, установим условия, которые определяют эту устойчивость. Если вращение вокруг оси G_z устойчиво, то w_x и w_y малы и в уравнениях системы можно пренебречь слагаемыми с $w_x w_y$. После исключения малых второго порядка, положив $w_z \sim w_0$, получаем

$$\dot{w}_x + w_0 w_y (I_z - I_y) / I_x = 0, \quad \dot{w}_y + w_0 w_x (I_x - I_z) / I_y = 0.$$

После дифференцирования приводим к виду

$$\ddot{w}_x + \alpha w_x = 0; \quad \ddot{w}_y + \alpha w_y = 0,$$

где $\alpha = \frac{(I_z - I_y)(I_z - I_x)}{I_x I_y} w_0^2$.

При $\alpha < 0$ решения уравнений имеют вид

$$w_x = C_1 \exp\left(\sqrt{|\alpha| \cdot t}\right) + C_2 \exp\left(-\sqrt{|\alpha| \cdot t}\right);$$

$$w_y = C_3 \exp\left(\sqrt{|\alpha| \cdot t}\right) + C_4 \exp\left(-\sqrt{|\alpha| \cdot t}\right).$$

При $\alpha > 0$

$$w_x = C'_1 \cos\sqrt{\alpha \cdot t} + C'_2 \sin\sqrt{\alpha \cdot t};$$

$$w_y = C'_3 \cos\sqrt{\alpha \cdot t} + C'_4 \sin\sqrt{\alpha \cdot t},$$

где $C_1, C_2, C_3, C_4, C'_1, C'_2, C'_3, C'_4$ — произвольные постоянные интегрирования.

Следовательно, при $\alpha > 0$ имеем устойчивость вращения вокруг главной оси инерции G_z . Условие $\alpha > 0$ может выполняться в двух случаях: во-первых, когда $I_z < I_y$ и $I_z < I_x$. Из этого следует, что вращение вокруг главной оси инерции G_z является устойчивым, если момент инерции относительно этой оси наибольший или наименьший.

При $\alpha < 0$ имеем неустойчивость. В этом случае I_z является средним по сравнению с I_x и I_y

$$I_x < I_z < I_y$$

или

$$I_x > I_z > I_y.$$

Анализ условий устойчивости деформирующего элемента показал, что движения элемента, их стабильность при возмущениях, вызванных взаимодействием с поверхностью, рельеф которой носит стохастический характер, зависит от формы и размеров деформирующего элемента. Причем устойчивы движения тел такой формы, момент инерции которых вокруг оси вращения является наименьшим или наибольшим. Предпочтительными, при прочих равных условиях, являются деформирующие элементы с наибольшим моментом инерции, так как это дает больший собственный кинетический момент. Кроме того, ось вращения с наибольшим моментом инерции оказывается более устойчивой к действию сил сопротивления, зависящих линейно от угловой скорости вращения деформирующего элемента.

5. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

5.1. Порошковые материалы. Структура и свойства

При электромагнитной наплавке можно применять широкую гамму порошковых материалов, что позволяет изменять и прогнозировать механические, термические, электрические и другие свойства рабочих поверхностей деталей. Требования к порошковым материалам вытекают из сущности и целей технологического процесса:

- материал порошка должен иметь хорошие магнитные свойства и невысокую температуру плавления, обеспечивающие устойчивость процесса наплавки;
- обладать небольшим разбросом по грануляции для получения качественного покрытия;
- иметь хорошую текучесть для равномерной транспортировки в зону наплавки;
- обеспечивать достаточную плотность покрытия, равномерность структуры, хорошую адгезию с основой и не образовывать трещин при формообразовании;
- формировать покрытие с требуемыми физико-механическими свойствами.

Химический состав наиболее широко применяемых для ЭМН порошков приведен в табл. 5.1.

Необходимо отметить, что для удовлетворения повышенной износостойкости покрытия материал порошка должен обеспечивать образование закалочной структуры высокой твердости. Одним из таких образований в состоянии закалки является мартенсит, который, однако, склонен к образованию трещин в покрытии и к нарушению адгезии в условиях ударно-динамической нагрузки. Дополнительное упрочнение структуры может быть обеспечено получением твердых дисперсных фаз, что предполагает достаточно высокую концентрацию легирующих элементов. Магнитные свойства порошков лучше

Табл. 5.1.
Химический состав ферромагнитных порошков.

№ п/п	Марка порошка	Содержание элементов, массовая доля, %														
		C	V	Ti	Si	B	Ni	Mn	Cr	W	Mo	Co	Al	S	P	
1.	Fe-2%V	0,5	2,0	—	0,4	—	—	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—
2.	Fe-10%V	0,5	10,0	—	0,4	—	—	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—
3.	Fe-Ti	0,5	—	5,0	0,4	—	—	0,4	—	—	—	—	—	—	—	—
4.	C-300	3,0	5,0	—	3,0	1,0	—	0,4	12,0	—	—	—	—	—	—	—
5.	P6M5K5	0,8	2,0	—	0,5	—	—	0,4	4,2	6,0	5,0	5,0	—	—	—	—
6.	P6M5Ф3	0,8	3,0	—	0,5	—	—	0,4	4,2	6,0	5,0	5,0	—	—	—	—
7.	ПЖРВ2	0,03	—	—	0,08	—	—	0,15	—	—	—	—	—	0,02	0,02	0,02
8.	ПР-Сталь 45-1% В	0,45	1,1	—	0,2	1,0	0,3	0,6	0,3	—	—	—	—	—	—	—
9.	ФБ-3	—	—	—	8,22	9,0	—	—	—	—	—	—	8,2	—	—	—
10.	Fe-6%Cr	0,8	—	—	2,0	—	—	—	6,0	—	—	—	—	—	—	—

всего удовлетворяет чистое железо, а также кобальт и его сплавы, использование которых в производстве затруднено из-за их высокой стоимости. Поэтому оптимальным решением при выборе материалов для ЭМН должно явиться компромиссное сочетание вышеуказанных требований. Следовательно, для выбора материалов с наиболее благоприятным сочетанием требуемых свойств должны рассматриваться порошковые материалы на основе железа, упрочненные твердыми фазами карбидного или интерметаллидного типа.

Удовлетворительная текучесть такого порошка обеспечивается округлой и гладкой поверхностью частиц. Исходя из особенностей технологии нанесения покрытия, размер частиц порошков должен находиться в пределах 200...350 мкм, что обеспечивается рассевом порошка.

Экспериментально установлено, что в качестве материалов, перспективных для осуществления ЭМН, рекомендуется использовать следующие (табл. 5.1): сталь 45, упрочненная бором; ферросплавы; двухкомпонентные сплавы на основе железа; быстрорежущие стали; высокоуглеродистые эвтектические сплавы.

Порошковая борированная сталь 45 чаще всего близка по составу к материалу широкого спектра упрочняемых деталей, имеет хорошие магнитные свойства, не содержит дефицитных легирующих элементов, поэтому может быть использована для восстановления изношенных поверхностей. В качестве упрочняющего элемента содержит бор.

Ферросплавы на основе бора и хрома не являются дефицитными материалами, выпускаются в достаточном количестве металлургической промышленностью, содержат элементы, образующие с железом и углеродом износостойкие карбиды и интерметаллиды.

Порошковые сплавы железо-ванадий и железо-титан имеют минимальное количество компонентов. Ванадий и титан с углеродом могут образовывать устойчивые твердые карбиды, что позволяет в перспективе создавать более сложные сплавы с высокой износостойкостью.

Порошки быстрорежущих сталей широко используются для нанесения износостойких покрытий не только ЭМН, но и другими методами. Они стандартизованы, имеют постоянный химический и гранулометрический состав, сохраняют высокую твердость и износостойкость в сформированных покрытиях

до температур 600—620°C, что очень важно в связи с непостоянством температурного режима на поверхности сопряженных и трущихся деталей.

Сплавы типа С-300 используются для нанесения покрытий газоплазменным способом. Их особенностью является низкая температура плавления, однородная дисперсная структура и высокая износостойкость.

Морфология и микроструктура отдельных частиц порошков имеют большое значение, т. к. характеристики порошка наряду с химическим и гранулометрическим составом определяют свойства покрытий. При наплавке не весь порошок оседает в виде покрытия на поверхность заготовки. Определенная часть порошка, проходя через рабочую зону установки и подвергаясь тепловому воздействию, не взаимодействует с поверхностью заготовки и остается неиспользованной. С точки зрения экономичности процесса возможно повторное использование порошка, прошедшего через рабочую зону.

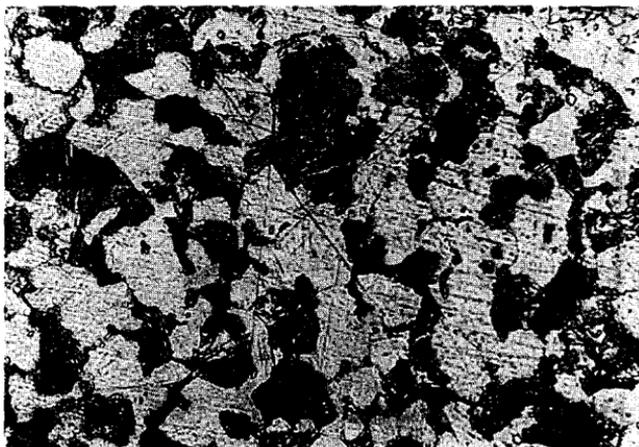
Частицы порошка углеродистой стали, полученные путем распыления расплава стали 45 водой с последующим борированием их поверхности, имеют размер не более 250 мкм и представляют собой почти правильные сфероиды (рис. 5.1, в). Их микроструктура состоит из феррита и перлита и по соотношению структурных составляющих практически соответствует марке стали 45, однако в процессе распыления происходит некоторое снижение содержания углерода. На поверхности частиц располагается слой боридов, придающих их поверхности чешуйчатое строение (рис. 5.1, г). При нанесении покрытия из такого порошка возможно упрочнение его боросодержащими фазами.

Порошковые частицы высокохромистого сплава имеют округлую сфероидальную или эллипсоидную форму, иногда каплевидную форму, что характерно для относительно крупных частиц при распылении расплава водой (рис. 5.2, в). На поверхности частиц видны оксиды в виде чешуек и специфический рельеф в форме дендритов, образующийся при быстром охлаждении (рис. 5.2, г). Микроструктура порошка — аустенит и карбиды M_7C_3 гексагональной формы в виде эвтектических колоний и избыточных образований игольчатой формы (рис. 5.2, а, б). Присутствие большого количества карбидной фазы (до 40%) свидетельствует о высоком содержании углерода в сплаве. Микротвердость карбидов составляет 17 800—22 000 МПа при средней (интегральной) твердости частиц 6000 МПа, что обусловлено присутствием в структуре



а

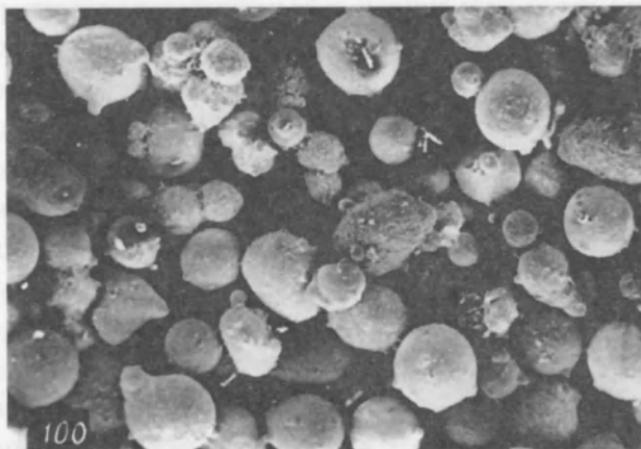
х 200



б

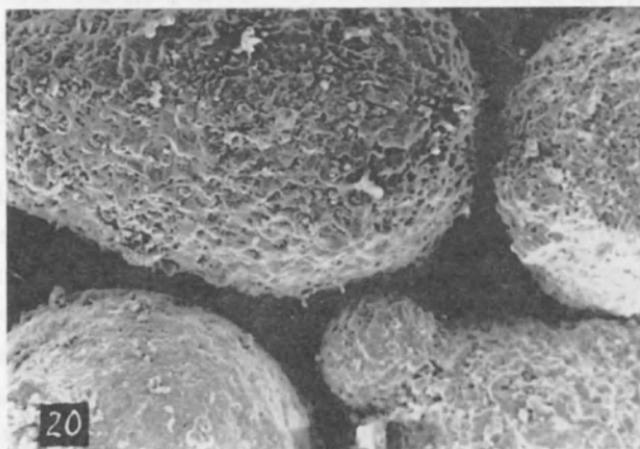
х 800

*Рис. 5.1. Фотографии частиц порошка стали 45, полученных из расплава распылением водой и борированием поверхности:
а, б — микроструктура частиц.*



в

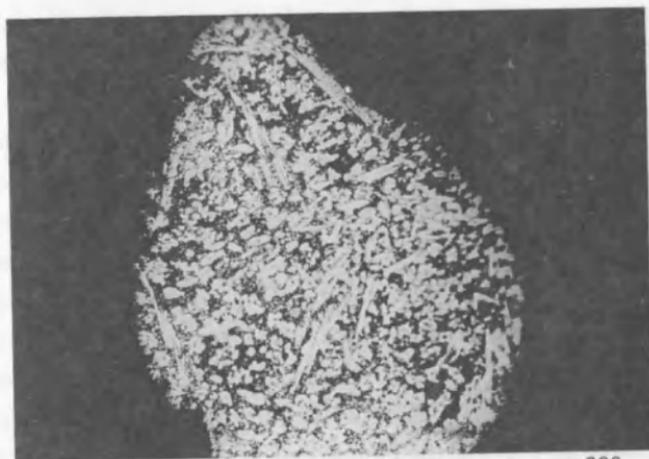
x 100



г

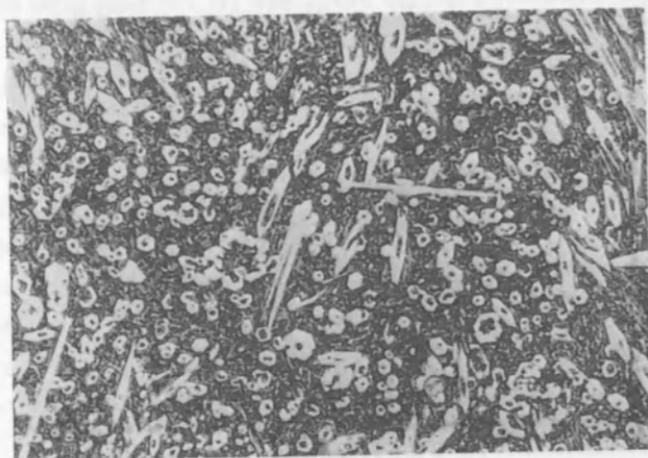
x 500

Рис. 5.1 (окончание). Фотографии частиц порошка стали 45, полученных из расплава распылением водой и борированием поверхности: в — форма частиц в исходном состоянии; г — бориды на поверхности частиц.



а

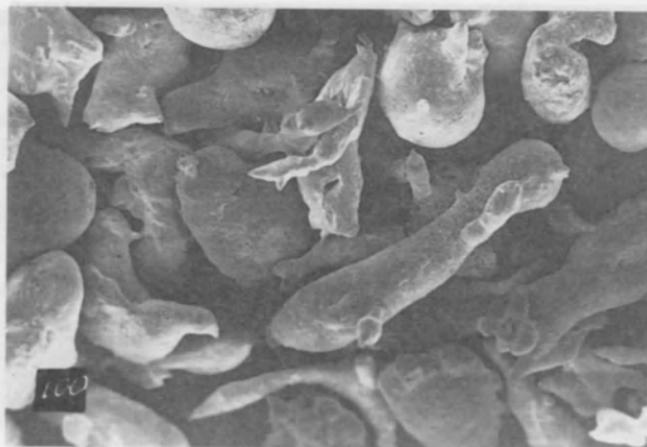
x 200



б

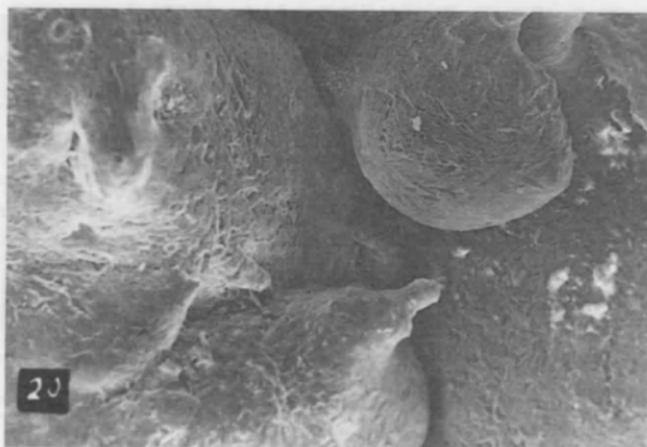
x 800

Рис. 5.2. Фотографии частиц порошка высокоуглеродистого феррохрома, полученных из расплава распылением водой: а, б — микроструктура частиц.



в

x 100



г

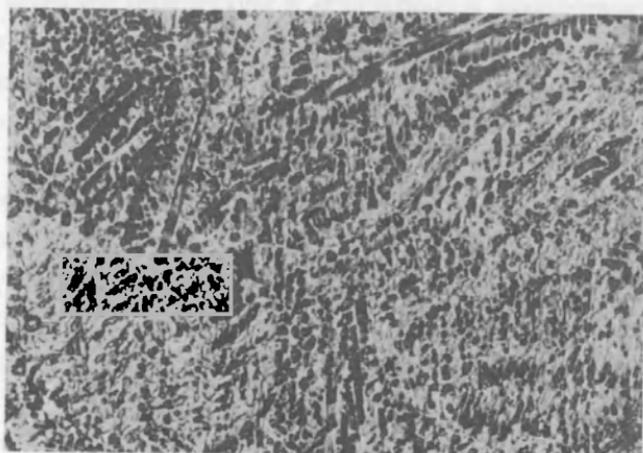
x 500

Рис. 5.2 (окончание). Фотографии частиц порошка высокоуглеродистого феррохрома, полученных из расплава распылением водой:
 в — форма частиц в исходном состоянии;
 г — дендритное строение поверхности частиц.

мягкой составляющей — аустенита. Такая структура обеспечивает материалу высокую износостойкость и способность к упрочнению наклепом в процессе эксплуатации за счет частичного превращения метастабильного аустенита в мартенсит. В то же время данный порошок не обладает достаточными магнитными свойствами и требует дополнительной переработки для использования в процессе электромагнитной наплавки.

Частицы порошка ферробора, полученного механическим измельчением в шаровой мельнице, в исходном состоянии имеют угловатую осколочную форму (рис. 5.3, в). Размер частиц 200—300 мкм, их микроструктура неоднородна, что присуще ферросплаву, который содержит до 9% бора. Большая часть порошковых частиц имеет мелкую дендритно-ячеистую структуру (рис. 5.3, а), состоящую из α — твердого раствора и эвтектики на основе бора и железа. Отдельные частицы имеют структуру, состоящую из мягкого α — твердого раствора (830 МПа) и крупных включений боридов, имеющих твердость 12 000 МПа (рис. 5.3, б). Твердость частиц с эвтектической структурой составляет более 8250 МПа. Различие в структуре отдельных порошковых частиц отрицательно влияет на равномерность свойств упрочненной поверхности при нанесении покрытий. Порошок ферробора имеет хорошие магнитные свойства и, благодаря этому, используется в процессе электромагнитной наплавки. После пребывания в рабочей зоне установки частицы порошка сохраняют свою первоначальную форму, но на их поверхности появляются следы оплавления и разрушения поверхностной оксидной пленки (рис. 5.3, г). Наплавленный слой при использовании порошка ферробора будет достаточно хрупким из-за высокого содержания боридных фаз.

Основное назначение распыленных водой сплавов железа с ванадием и титаном — это использование их в качестве полирующего ферроабразивного материала. Эти же порошковые материалы при незначительной корректировке по химическому составу могут быть использованы как наплавочные. Предпосылкой к этому, наряду с хорошими магнитными свойствами, является образование при быстром охлаждении мартенситной структуры с достаточно высокой твердостью и возможное упрочнение твердого раствора интерметаллидными фазами на основе ванадия и титана. При небольших добавках углерода дополнительными упрочняющими фазами становятся карбиды титана и ванадия.



а

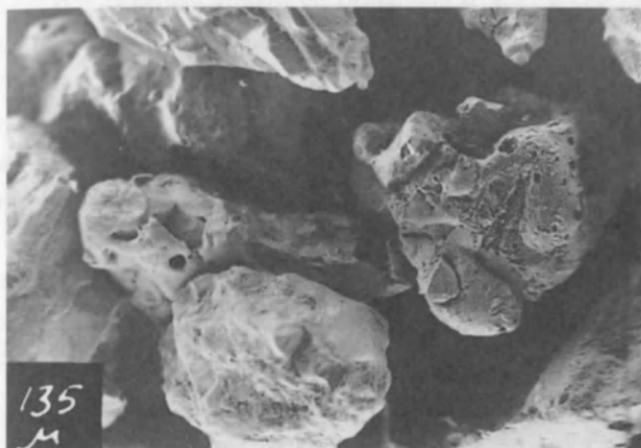
х 800



б

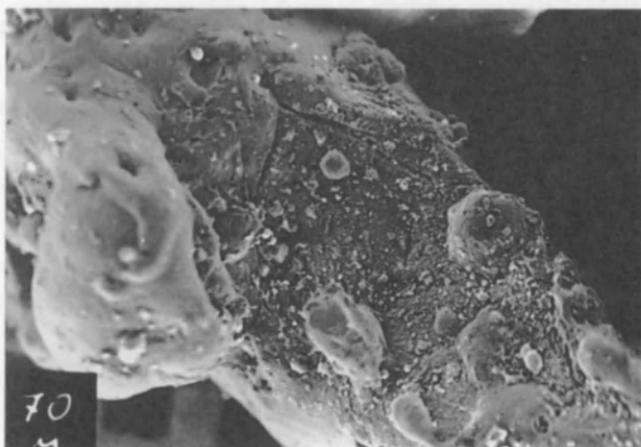
х 200

Рис. 5.3. Фотографии частиц порошка сплава ФБ-3, полученных механическим измельчением:
а, б — микроструктура частиц.



в

x 100



г

x 500

Рис. 5.3 (окончание). Фотографии частиц порошка сплава ФБ-3, полученных механическим измельчением: в — форма частиц в исходном состоянии; г — форма и состояние поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.

Фотографии микроструктуры и микрогеометрии порошка сплава $Fe-Ti$ представлены на рис 5.4. В исходном состоянии частицы порошка имеют осколочную форму, что характерно для распыленных водой достаточно вязких расплавов, и покрыты слоем оксидов титана (рис. 5.4, б, в). При прохождении через рабочую зону установки частицы порошка подвергаются частичному оплавлению и приобретают сферическую форму уже без признаков оксидной пленки на поверхности (рис. 5.4, г). На крупных частицах происходит сглаживание неровностей (рис. 5.4, д), а те из них, которые подвергались нагреву до высоких температур с последующим быстрым охлаждением, но не достигали температуры плавления, приобретают рельеф поверхности, связанный с растрескиванием оксидной пленки и формированием структуры, напоминающей видманштеттову, что свидетельствует о высокой температуре нагрева (рис. 5.4, е).

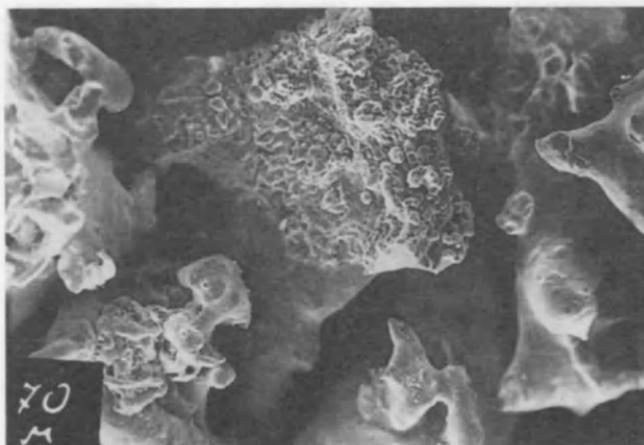
Микроструктура частицы порошка (рис. 5.4, а) представляет собой мартенсит на основе малоуглеродистого твердого раствора титана в железе, имеющего твердость 3200 МПа. Такая структура соответствует диаграмме состояния железо-титан. Согласно этой диаграмме, титан выклинивает γ -область и в интервале концентраций 0—5% мас. образует с α -железом непрерывный ряд твердых растворов. Поскольку с понижением температуры концентрация титана в α -железе уменьшается, сплавы упрочняются при старении за счет выделения фазы Fe_2Ti . Таким образом, использование порошков на основе систем железо-титан является перспективным.

С точки зрения использования для электромагнитной наплавки представляют также интерес сплавы системы железо-ванадий. Ванадий так же, как и титан, образует с железом непрерывный ряд твердых растворов, замыкая границу существования $\alpha + \gamma$ и γ -фаз примерно при 1% ванадия. Следовательно, сплавы $Fe-V$ обладают высокими магнитными свойствами. При быстром охлаждении пересыщенного ванадием твердого раствора образуется мартенсит, твердость которого определяется концентрацией ванадия в сплаве. Фотографии микроструктур порошковых частиц сплавов $Fe-2\% V$ и $Fe-10\% V$ приведена на рис. 5.5, а и 5.6, а. Присутствие в сплавах углерода приводит к выделению карбидов по границам зерен. Чем больше этих выделений, тем ниже твердость сплава. Так, сплав $Fe-2\% V$ имеет твердость 6520 МПа, а сплав $Fe-10\% V$ — 4780 МПа.



а

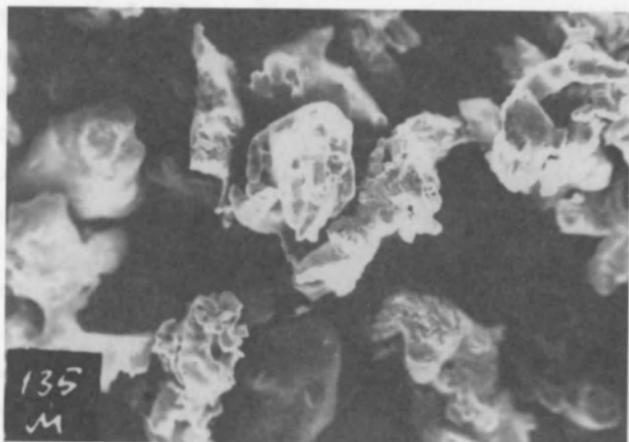
x 800



б

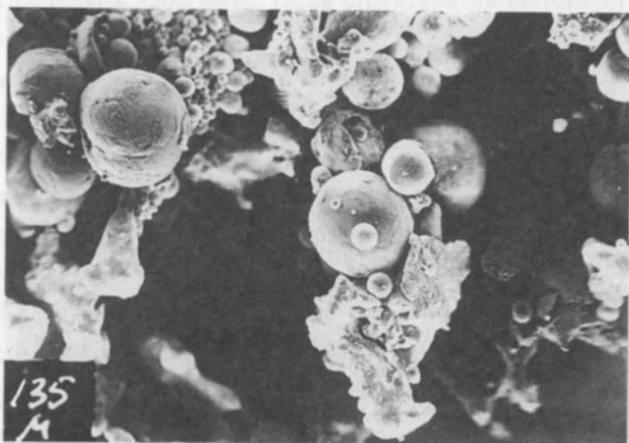
x 250

Рис. 5.4. Фотографии частиц порошка сплава Fe-Ti, полученных из расплава распылением водой:
а — микроструктура частиц; б — форма частиц в исходном состоянии.



в

x 100



г

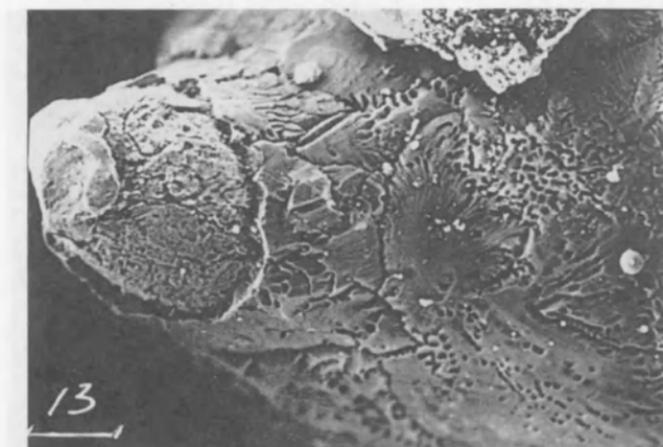
x 100

Рис. 5.4 (продолжение). Фотографии частиц порошка сплава Fe-Ti, полученных из расплава распылением водой:
 в — форма частиц в исходном состоянии;
 г — форма и состояние поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.



д

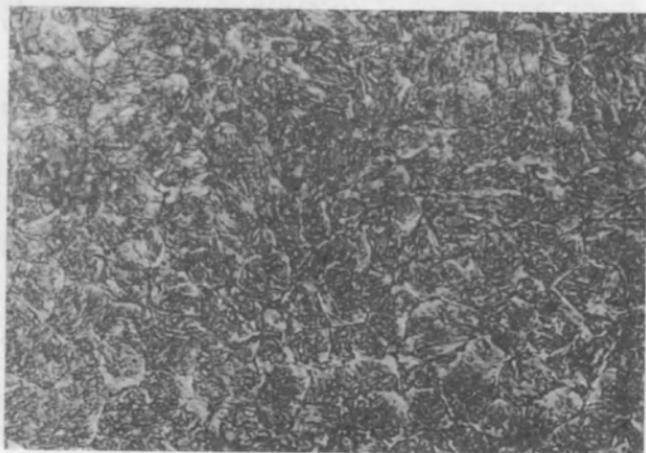
x 250



е

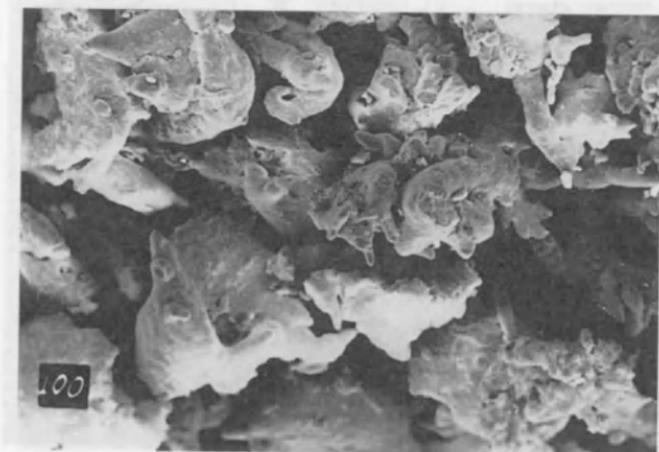
x 1000

Рис. 5.4 (окончание). Фотографии частиц порошка сплава Fe-Ti, полученных из расплава распылением водой:
 д — форма поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки;
 е — дендритное строение поверхности частицы.



a

x 800



б

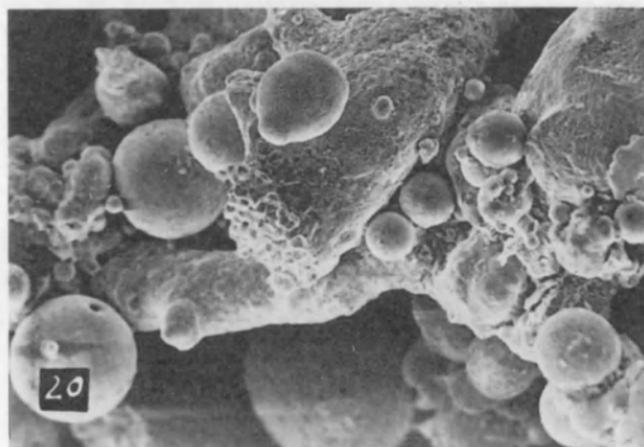
x 100

Рис. 5.5. Фотографии частиц порошка сплава Fe-2%V, полученных из расплава распылением водой: а — микроструктура частиц; б — форма частиц в исходном состоянии.



в

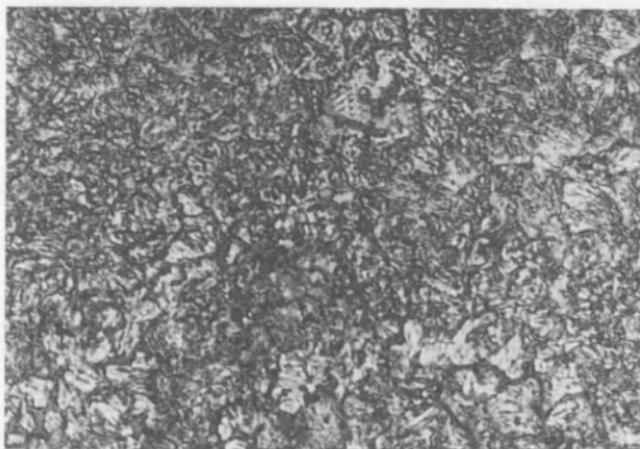
x 500



г

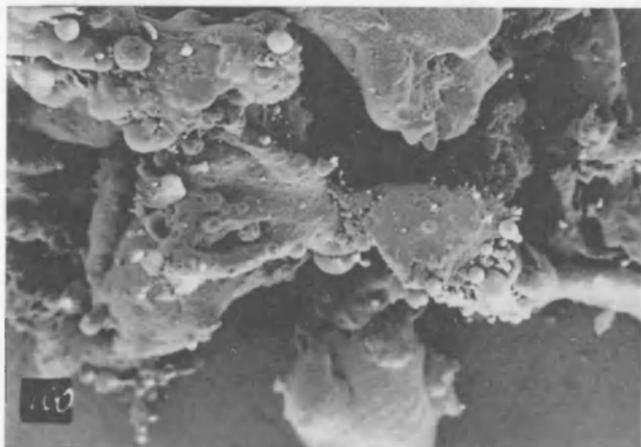
x 100

Рис. 5.5 (окончание). Фотографии частиц порошка сплава Fe-2%V, полученных из расплава распылением водой:
в — оксиды ванадия на поверхности частиц;
г — форма и состояние поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.



а

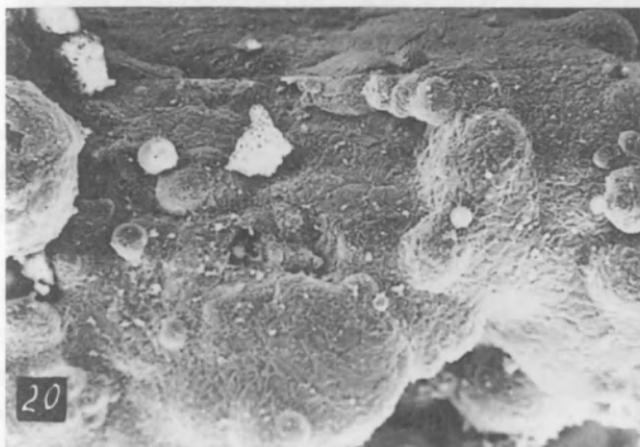
x 800



б

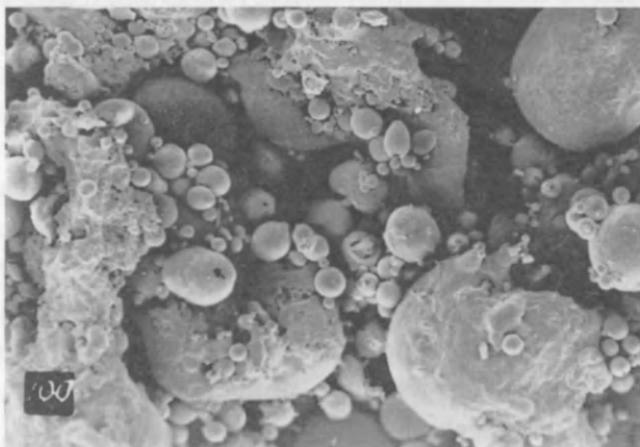
x 100

Рис. 5.6. Фотографии частиц порошка сплава Fe-10%V, полученных из расплава распылением водой:
а — микроструктура частиц; б — форма частиц в исходном состоянии.



в

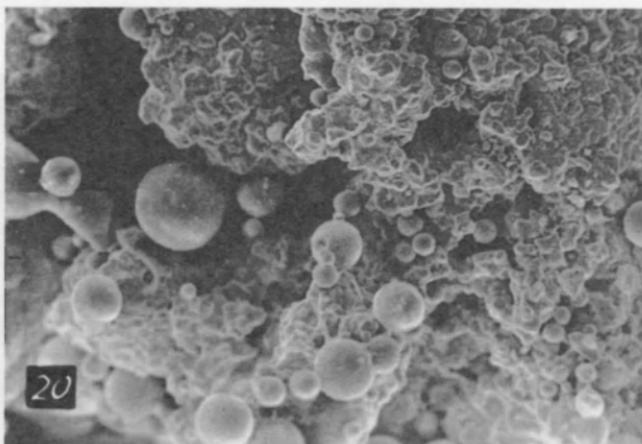
x 500



г

x 100

Рис. 5.6 (продолжение). Фотографии частиц порошка сплава Fe-10%V, полученных из расплава распылением водой: в — оксиды ванадия на поверхности частиц; г — форма и состояние поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.



д

x 500

Рис. 5.6 (окончание). Фотографии частиц порошка сплава Fe-10%V, полученных из расплава распылением водой: д — форма и состояние поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.

Повышенная вязкость жидкого расплава приводит к образованию при распылении водой порошковых частиц неправильной формы (рис. 5.5, б и 5.6, б), покрытых слоем оксидов ванадия, которые наблюдаются на рис. 5.5, в и 5.6, в. При прохождении через рабочую зону установки крупные частицы порошка подвергаются нагреву и быстрому охлаждению, в результате чего слой оксидов на их поверхности частично растрескивается (рис. 5.5, г и 5.6, г). Сплавы железа с ванадием могут быть использованы для электромагнитной наплавки в силу хороших магнитных свойств и устойчивого режима горения дуги, о чем свидетельствует большое количество оплавившихся частиц порошка. Дополнительное упрочнение этих материалов может быть достигнуто за счет введения в состав углерода.

Установлено, что порошковые быстрорежущие стали обладают такими преимуществами, которые делают их весьма перспективными при использовании в качестве наплавочного материала: отсутствие макро- и микросегрегаций; однородность структуры, что обеспечивает более высокую пластичность материала и уменьшает хрупкость наплавленных слоев; повышенное содержание углерода, позволяющее получить более высокие значения твердости

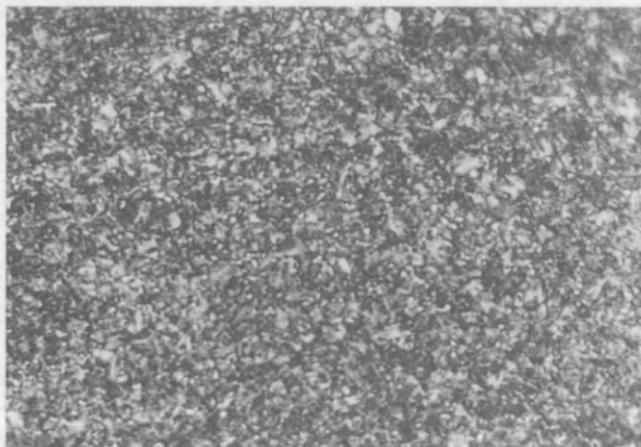
после отпуска; высокая дисперсность карбидных фаз, способствующая получению равномерной структуры покрытия.

Были изучены порошки быстрорежущих сталей (Р6М5К5 и Р6М5Ф3) двух сплавов, полученные путем распыления азотом. Эти стали являются наиболее распространенными и несколько отличаются по структуре и фазовому составу.

На рис. 5.7 и 5.8 показаны форма, размеры и микроструктура порошковых частиц этих сталей. Почти все они имеют на поверхности выступы или кратеры, образовавшиеся при столкновении мелких затвердевших частиц с более крупными, находящимися в жидком состоянии (рис. 5.7, б, в и 5.8, б). Размер частиц находится в пределах 50—300 мкм. Среди частиц порошка встречаются полые скорлупообразные частицы (рис. 5.7, е). При больших увеличениях видно ячеистое строение поверхности частиц (рис. 5.8, в). Поверхность некоторых частиц покрыта оксидными пленками (рис. 5.7, г). При прохождении через рабочую зону установки внешний вид большинства частиц не претерпевает изменений, что связано с более высокой температурой их плавления (рис. 5.8, г). Одновременно отмечается несколько меньше выступов на крупных частицах в результате отделения от них более мелких частиц при нагреве и охлаждении. При большом увеличении видно ячеистое строение поверхности частиц (рис. 5.7, д, е; рис. 5.8, д). Твердость частиц обеих сталей примерно одинакова и составляет 5100—5500 МПа.

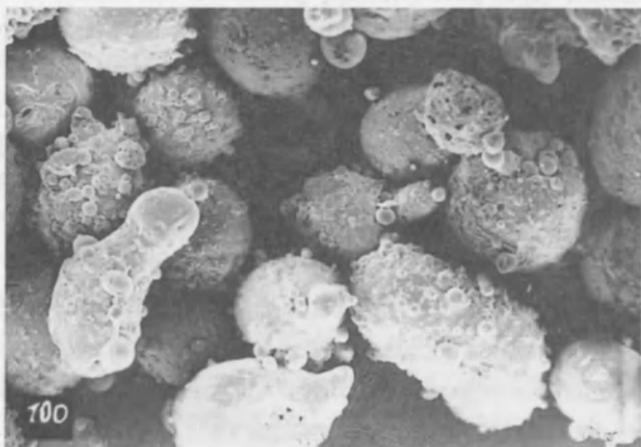
Микроструктура частиц порошка стали Р6М5К5 (рис 5.7, а) тонкодисперсная, ячеисто-дендритная. Основными фазами являются: твердый раствор в виде мартенсита (темная составляющая) и остаточный аустенит (светлая составляющая), а также мелкие равномерно распределенные в металлической матрице (в основном, в мартенсите) карбиды типа M_2C , M_6C , M_3C_2 .

В крупных порошковых частицах стали Р6М5Ф3 по границам бывших аустенитных зерен при кристаллизации успевают выделиться эвтектика из карбида MC на основе ванадия и аустенита (рис. 5.8, а), местами вырождающаяся в сетку карбидов.



а

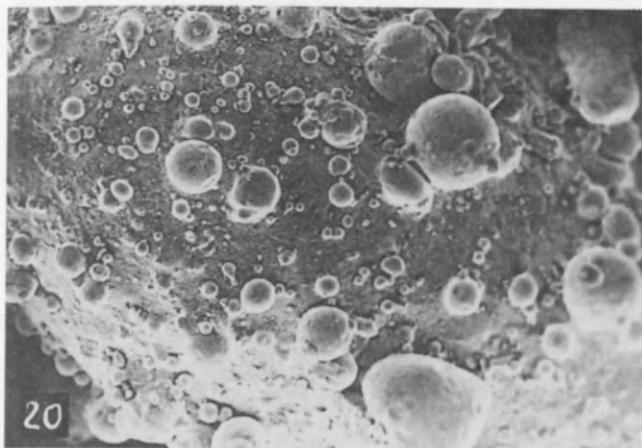
x 800



б

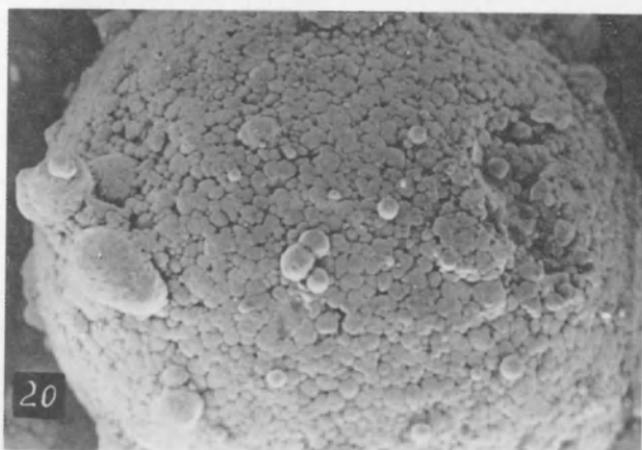
x 100

Рис. 5.7. Фотографии частиц порошка быстрорежущей стали Р6М5К5, полученных из расплава распылением азотом: а — микроструктура частиц; б — форма частиц в исходном состоянии.



а

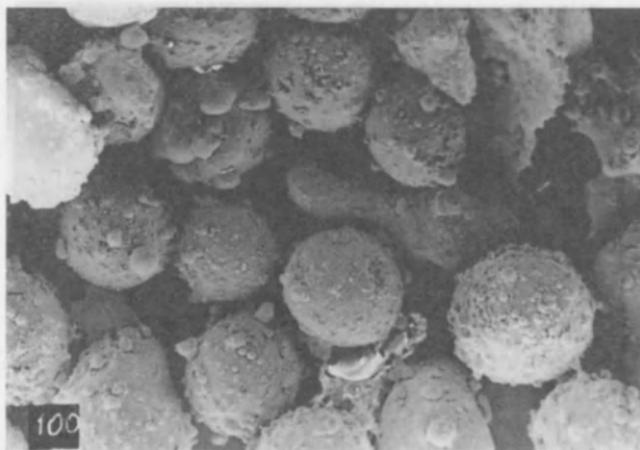
x 500



б

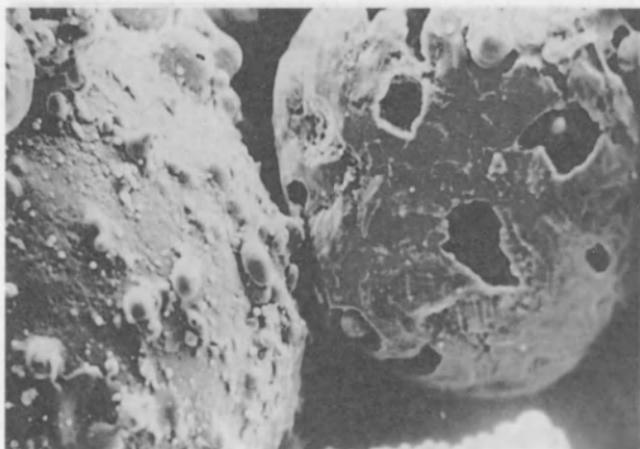
x 500

Рис. 5.7 (продолжение). Фотографии частиц порошка быстрорежущей стали Р6М5К5, полученных из расплава распылением азотом: а, б — поверхность частиц.



д

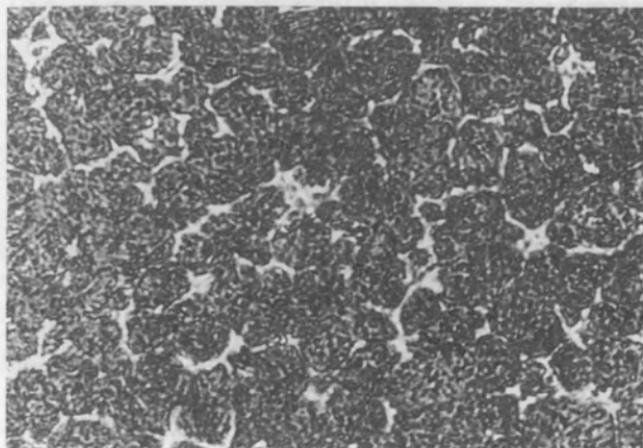
x 100



е

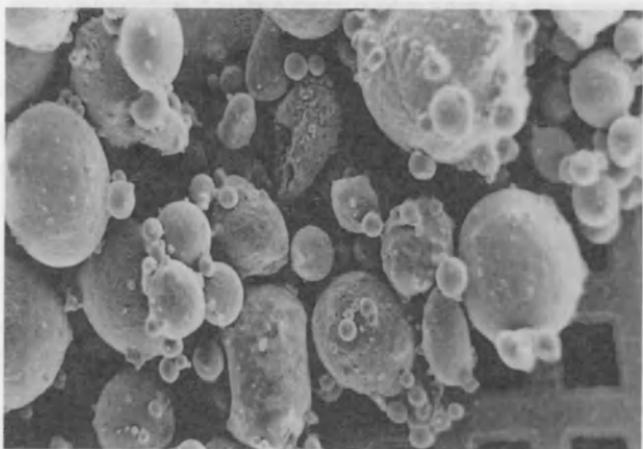
x 500

Рис. 5.7 (окончание). Фотографии частиц порошка быстрорежущей стали Р6М5К5, полученных из расплава распылением азотом:
д, е — форма и состояние поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.



а

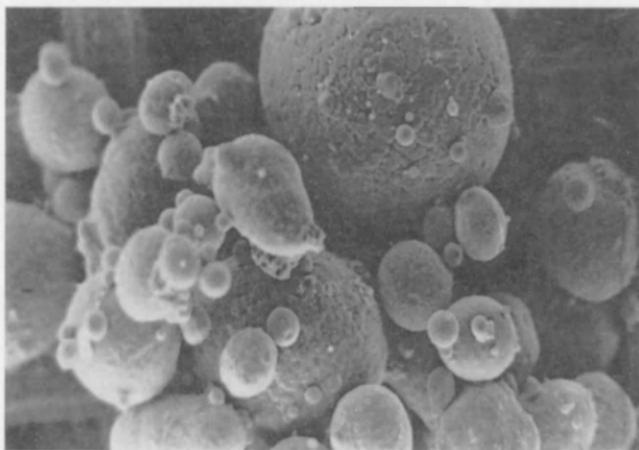
x 800



б

x 100

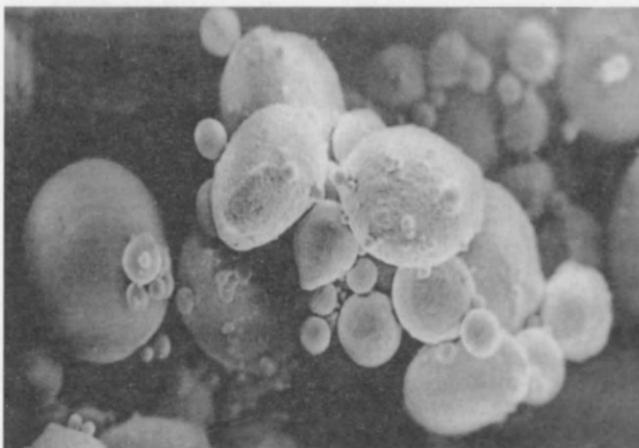
Рис. 5.8. Фотографии частиц порошка быстрорежущей стали Р6М5Ф3, полученных из расплава распылением азотом: а — микроструктура частиц; б — форма частиц в исходном состоянии.



008 x

в

x 500

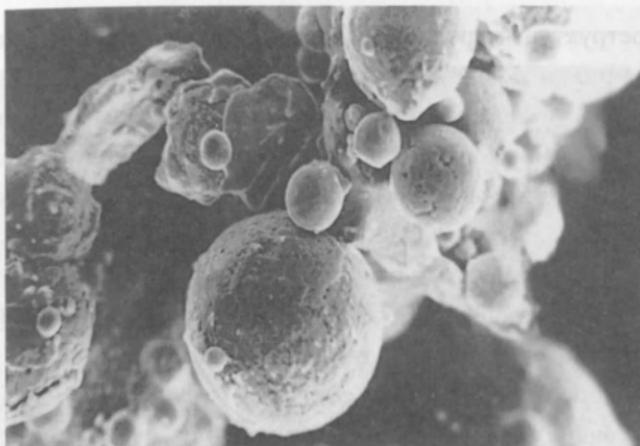


008 x

г

x 250

Рис. 5.8 (продолжение). Фотографии частиц порошка быстрорежущей стали Р6М5Ф3, полученных из расплава распылением азотом:
в — форма частиц в исходном состоянии;
г — форма и состояние поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.



д

x 500

Рис. 5.8 (окончание). Фотографии частиц порошка быстрорежущей стали P6M5Ф3, полученных из расплава распылением азотом: д — форма и состояние поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.

Таким образом, как следует из рассмотрения микроструктуры и строения порошковых частиц, порошки быстрорежущих сталей обладают высокой устойчивостью в межэлектродном промежутке, удовлетворительными магнитными свойствами, которые могут быть повышены за счет дополнительной обработки, приводящей к распаду остаточного аустенита. Следовательно, порошки могут быть использованы для получения электромагнитных износостойких покрытий.

Значительный интерес, с точки зрения получаемых свойств в покрытиях, представляет порошок сплава С-300, созданный на основе высокохромистого чугуна, как материал для формирования покрытий газоплазменным методом. От порошков, рассмотренных выше, его отличает относительно низкая температура плавления, высокая стойкость к окислению, что позволяет получать качественный материал при распылении сплава водой. Высокая износостойкость и твердость материала (5800—6000 МПа) обусловлены высоким содержанием в нем карбидов на основе хрома, ванадия и бора. Сплав обладает магнитными свойствами. Присутствие бора и кремния придает сплаву флюсующие свойства.

Микроструктура порошковых частиц представляет собой твердый раствор углерода в α - и γ -железе, соотношение которых может меняться в зависимости от скорости охлаждения и размера частиц, а также дисперсных, равномерно распределенных в металлической матрице карбидов (рис. 5.9, а).

Форма частиц порошка близка к сферической, на поверхности их имеется большое число выступов в виде мелких сферических частиц (рис. 5.9, б), а также следы ячеистой структуры (рис. 5.9, в, г). В порошке, после пребывания в рабочей зоне установки, можно наблюдать отдельные частицы с оплавленной гладкой поверхностью, а также частицы с разрушенной оболочкой, под которой видны мелкие плотные сфероиды (рис. 5.9, д, е).

По состоянию порошковых частиц после их прохождения через рабочую зону установки можно сделать вывод о возможности использования их при наплавке, что делает сам процесс более экономичным.

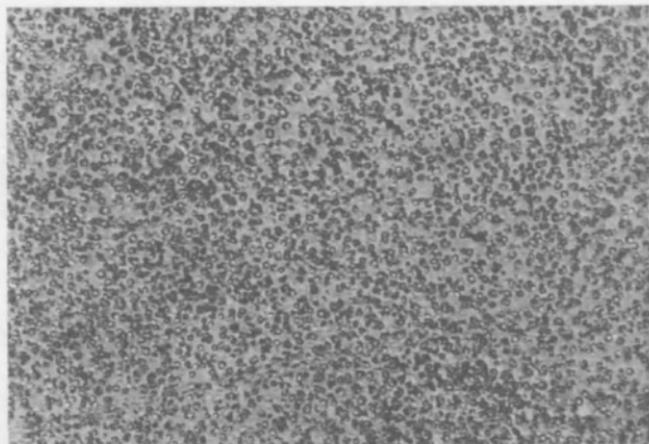
5.2. Структура, фазовый состав и свойства покрытий, сформированных ЭМН

5.2.1. Структурообразование покрытий при свободном осаждении жидкой фазы. Эксплуатационные и физико-механические свойства покрытий определяются их структурой, химическим и фазовым составом, которые в свою очередь зависят от режимов наплавки, свойств наплавочных материалов и состояния основы.

Рассмотрим закономерности формирования структуры покрытий, полученных электромагнитной наплавкой для следующих порошковых материалов:

- сплав Fe-10%V — представитель материалов со структурой твердого раствора;
- быстрорежущая сталь Р6М5Ф3 — гетерогенный сплав из твердого раствора и сложных карбидов;
- сплав С-300 — эвтектический высокоуглеродистый гетерогенный сплав на основе твердого раствора и эвтектических карбидов, имеющий относительно низкую температуру плавления.

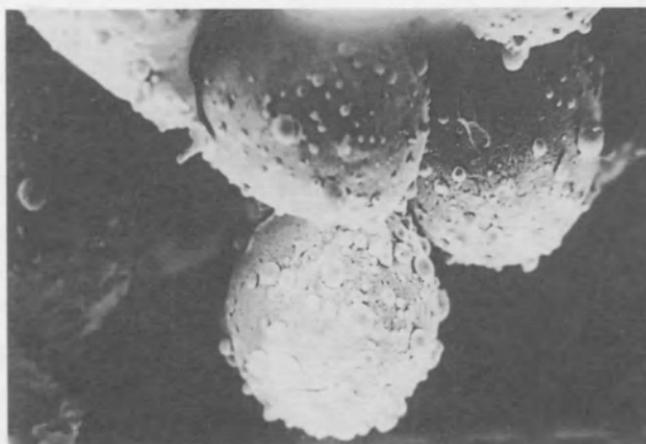
Покрyтия формировались при оптимальном режиме на образцах из стали 45 порошками зернистостью 240—320 мкм.



002 V

а

x 800

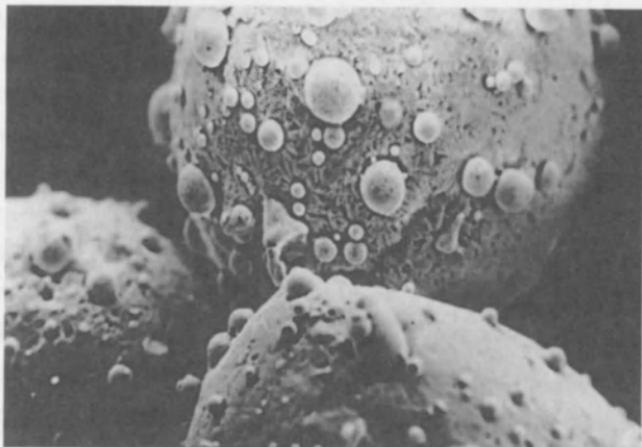


002 V

б

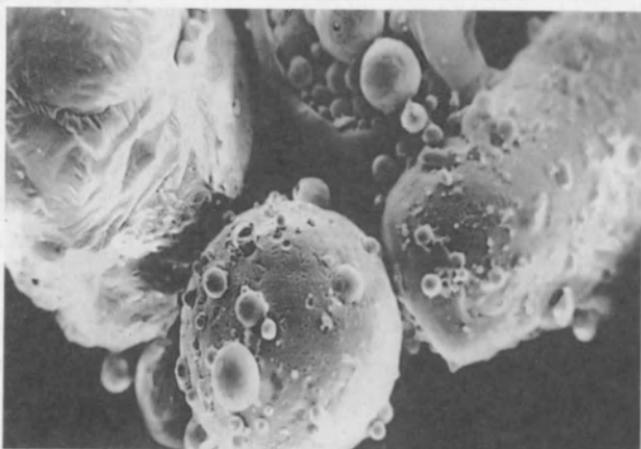
x 250

Рис. 5.9. Фотографии частиц порошка сплава С-300, полученных из расплава распылением водой:
а — микроструктура частиц; *б* — форма частиц в исходном состоянии.



в

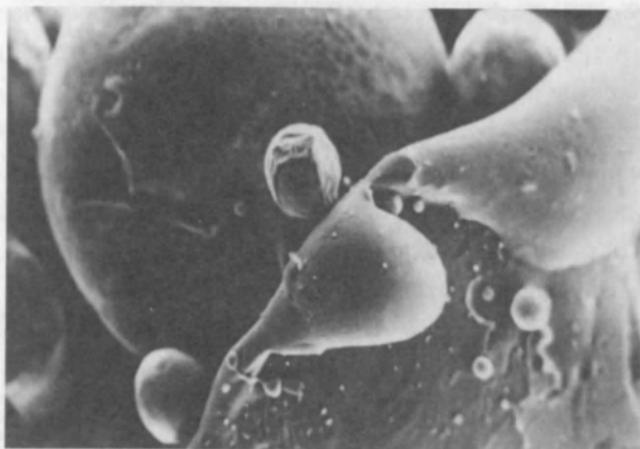
x 500



г

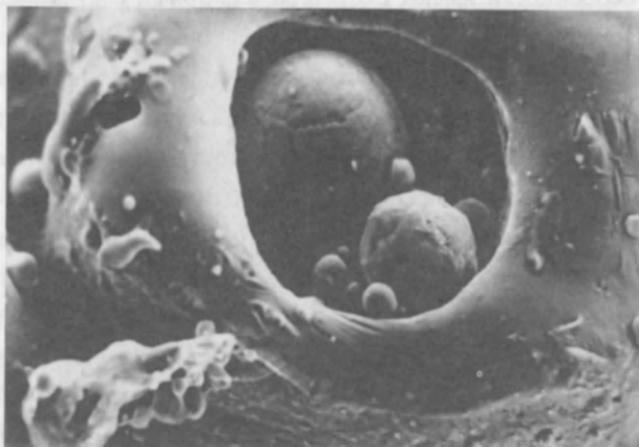
x 250

Рис. 5.9 (продолжение). Фотографии частиц порошка сплава С-300, полученных из расплава распылением водой:
 в — ячеистая структура поверхности частиц;
 г — плотные сфероиды и полые частицы.



д

x 500



е

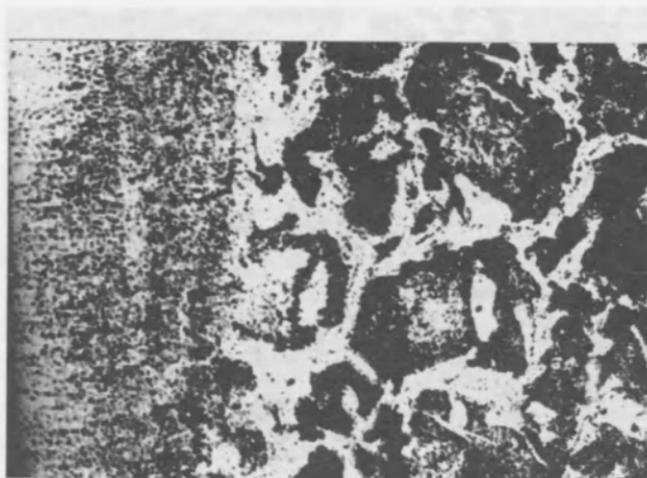
x 500

Рис. 5.9 (окончание). Фотографии частиц порошка сплава С-300, полученных из расплава распылением водой:
 д — плотные сфероиды и полые частицы;
 е — следы оплавления на поверхности частиц после пребывания в рабочей зоне установки.

При электромагнитной наплавке действие разрядного тока, проходящего через порошок, продолжается сотые доли секунды, однако частицы порошка успевают нагреться до температуры 1700...1800°C и расплавиться. Быстрое затвердевание капель расплава, сопровождаемое теплоотводом вглубь холодной основы, позволяет сравнить характер фазовых превращений в поверхностном слое с процессами электроискрового или лазерного легирования металлических поверхностей, при которых в момент затвердевания наплавляемого металла скорость охлаждения локально может достигать 10^5 град/с.

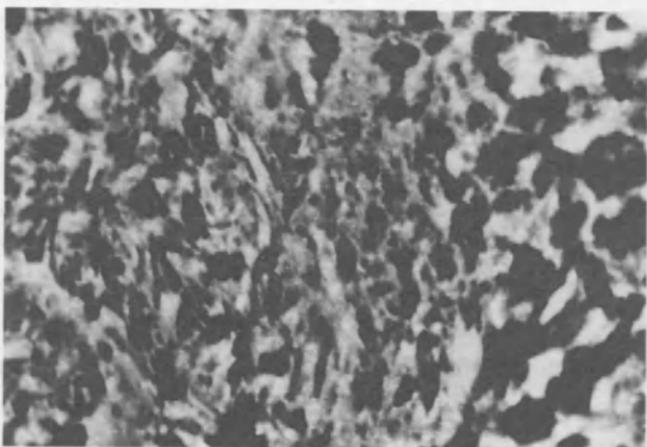
При нанесении покрытий электромагнитной наплавкой на поверхности заготовки формируется упрочненный слой, состоящий из двух основных зон — наплавленного слоя и примыкающей к нему со стороны основы зоны термического влияния, обычно соизмеримой с ним по толщине. Структура и толщина упрочненного слоя (при прочих равных условиях) определяются составом наплавляемого порошка.

Свои особенности имеют структура и фазовый состав покрытия, полученные наплавкой порошковых материалов. На рис. 5.10 представлены микроструктура и топография поверхности, полученной при наплавке порошком сплава Fe-10%V. Наплавленный слой представляет собой конгломерат очень мелких металлических пластин, по фазовому составу являющийся пересыщенным твердым раствором ванадия в α -железе. Вблизи границы с основой покрытие имеет столбчатое дендритно-ячеистое строение, ориентированное в направлении максимального теплоотвода, т. е. перпендикулярно к поверхности заготовки (рис. 5.10, а). В межосевых промежутках структура металла равноосна с малым количеством микропор, количество и размер которых убывает в направлении, перпендикулярном осям первого порядка. Наружная часть покрытия, формирующаяся на «теплой» основе, имеет равноосное ячеистое строение с меньшим количеством микропор (рис. 5.10, б). На границе раздела покрытие—основа на глубине до 40 мкм происходит полная фазовая перекристаллизация материала основы с образованием дислокационного мартенсита (рис. 5.10, в). Под этой частью зоны термического влияния располагается зона неполной закалки, структура которой представляет собой рекристаллизованный феррит и участки перлита, превратившегося в мартенсит или троостомартенсит. Твердость термоупрочненного слоя меняется от 8000 до 2700 МПа.



а

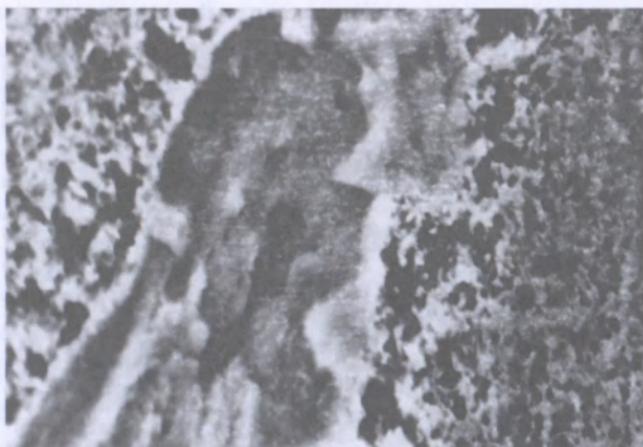
х 400



б

х 4500

Рис. 5.10. Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошка Fe-10%V: а — оптическая металлография. Поперечный шлиф; б — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.



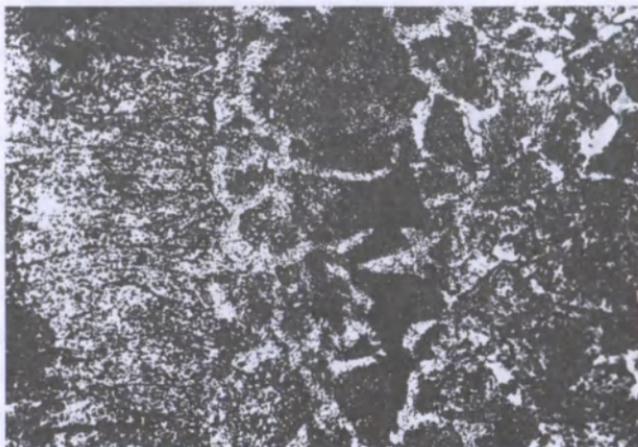
в

x 4500

Рис. 5.10 (окончание). Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошка Fe-10%V. Поперечный шлиф: в — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.

Фотографии микроструктуры слоя, упрочненного покрытием из порошка Р6М5Ф3, представлены на рис. 5.11. Анализируя приведенные фотографии микроструктуры, можно сделать вывод о соблюдении основных закономерностей формирования структуры покрытий, описанных выше. Так же как и в предыдущем случае, отмечается резкий переход от покрытия к основе и отсутствие зоны полной закалки в основе.

Приграничный тонкий слой, формирующийся из отдельных расплавленных частиц порошка (рис. 5.11, б, в), имеет два вида пористости — разветвленную, которая расположена по границам плотных фрагментов округлой формы, и мелкие поры в виде концентрированных усадочных раковин, расположенных в центре этих фрагментов. На рис. 5.11, г хорошо виден раздел между покрытием и основой, структура которой представляет собой эвтектоид пластинчатого строения, т. е. можно сделать вывод, что в результате быстрого затвердевания относительно мало перегретой частицы тугоплавкого порошка материал основы не подвергается значительному упрочнению. Основная



а

х 400



б

х 400

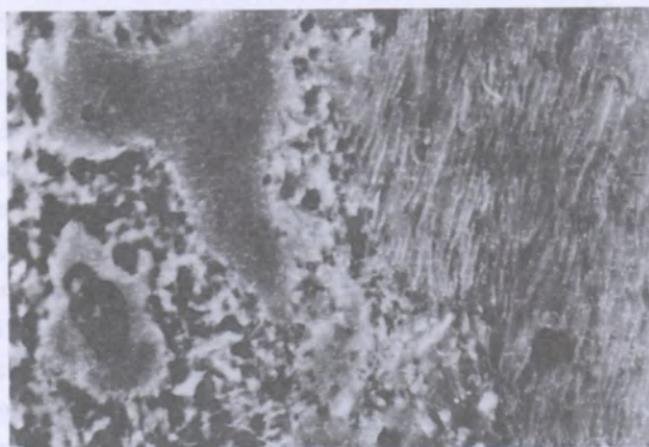
Рис. 5.11. Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошка Р6М5Ф3:

а — оптическая металлография. Поперечный шлиф; б — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.



а

x 4500



б

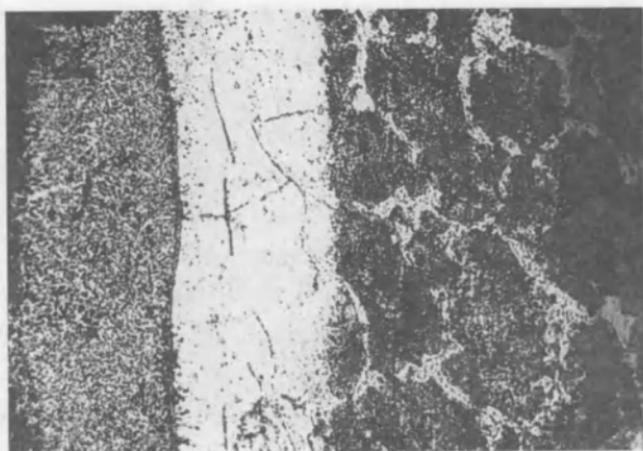
x 4500

Рис. 5.11 (окончание). Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошка Р6М5Ф3. Поперечный шлиф: в, г — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.

часть покрытия имеет дендритно-столбчатое строение, пористость ориентируется вдоль осей дендритов (рис. 5.11, б). Структура покрытия представляет собой смесь мартенсита и остаточного аустенита, соотношение которых определяет его твердость. Возможно присутствие некоторого количества дисперсных карбидов. Пористость составляет 6—8%.

Сплав С-300 имеет температуру плавления примерно 1280°C, что на 150—200°C ниже, чем у предыдущих сплавов. Его структура — это эвтектика из α — фазы и сложных карбидов на основе хрома, ванадия и бора. Низкая температура плавления обеспечивает сплаву С-300 при одинаковых режимах наплавки более высокий перегрев расплавленных порошковых частиц и большую неоднородность покрытия.

На поверхности заготовки после формирования покрытия образуется упрочненный слой, состоящий из двух примерно равных по толщине зон (рис. 5.12, а, в). Само покрытие имеет ярко выраженное дендритно-столбчатое строение вблизи основы и ячистое строение во внешнем слое (рис. 5.12, б). Между покрытием и основой четко обозначена поверхность раздела, под которой располагается зона термического влияния, меняющая структуру от однофазной (зона полной закалки) до двухфазной (зона неполной закалки). Однофазная структура представляет собой дислокационный мартенсит, а двухфазная — такой же мартенсит и рекристаллизованный феррит. Глубже этого слоя располагается зона из рекристаллизованного феррита и перлитоподобной составляющей, образовавшейся в результате нагрева перлита до температуры, незначительно превышающей точку A_{c1} , с последующим охлаждением. Пористость покрытия достаточно велика и достигает 10%. На рис. 5.13, а, б приведены данные о распределении хрома в упрочненном слое и топография поверхности, снятая в характеристическом излучении хрома. Они свидетельствуют о слабом развитии процесса диффузии легирующих элементов из покрытия в основу. В то же время, очевидно, успевает пройти диффузия углерода из высокоуглеродистого покрытия в поверхностный слой основы с образованием при быстром охлаждении высокоуглеродистого мартенсита.



x 400

а



x 4500

б

Рис. 5.12. Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошка С-300: а — оптическая металлография. Поперечный шлиф; б — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.



Рис. 5.12 (окончание). Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошка С-300. Поперечный шлиф: в — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.

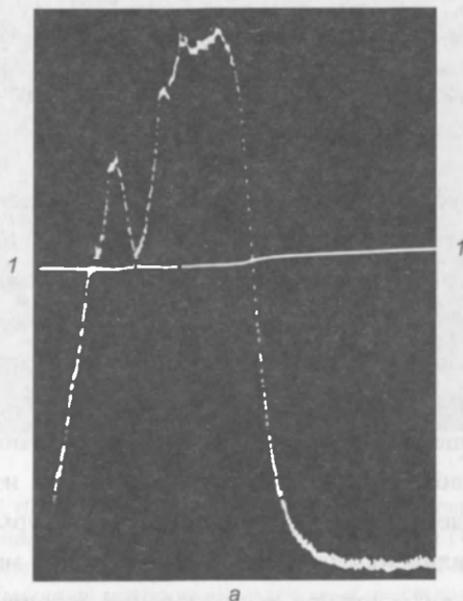
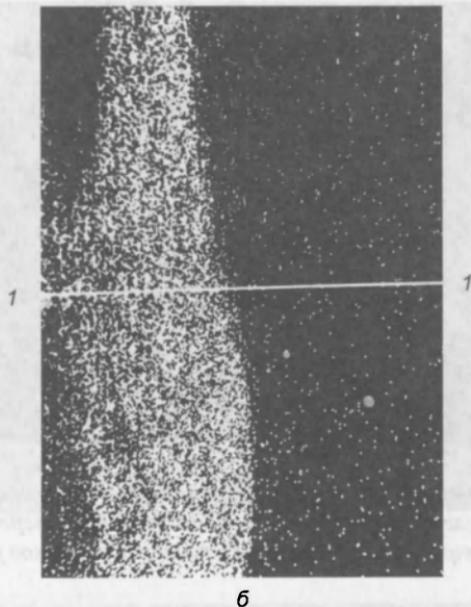


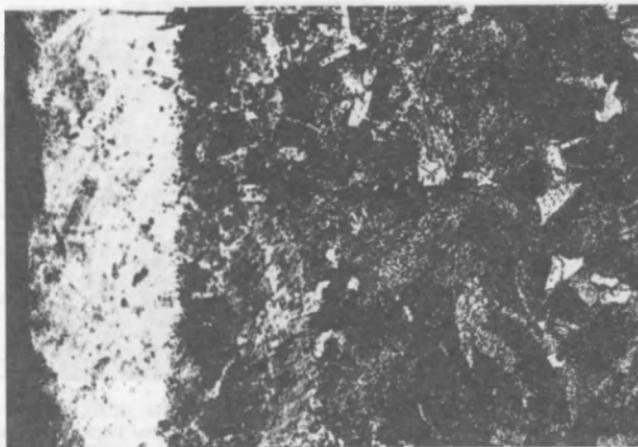
Рис. 5.13. Распределение хрома по глубине упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошка С-300: а — кривая распределения концентрации хрома при сканировании вдоль линии 1—1.



б

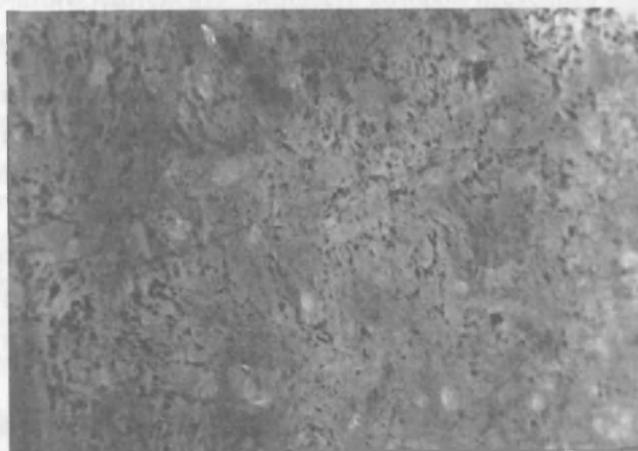
Рис. 5.13 (окончание). Распределение хрома по глубине упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошка С-300: б — топография поверхности упрочненного слоя, снятая в характеристическом излучении хрома.

5.2.2. Структурообразование покрытий при электромагнитной наплавке с поверхностным пластическим деформированием. Одним из способов уплотнения и выравнивания наплавленного слоя является поверхностное пластическое деформирование поверхности в процессе нанесения покрытия. Оно производится ротационным шариковым инструментом с упругим контактом с обрабатываемой поверхностью по стандартной схеме, когда покрытие находится еще в разогретом, пластичном состоянии. Такая обработка улучшает качество покрытия, повышая его плотность, изменяет микротопографию, а также воздействует на формирование структуры самого покрытия и зоны термического влияния. На рис. 5.14 представлена микроструктура и топография наплавленного слоя при использовании порошка $Fe-10\%V$. При совмещении электромагнитной наплавки с ППД структура упрочненного слоя имеет особенности, которые сводятся к следующему:



а

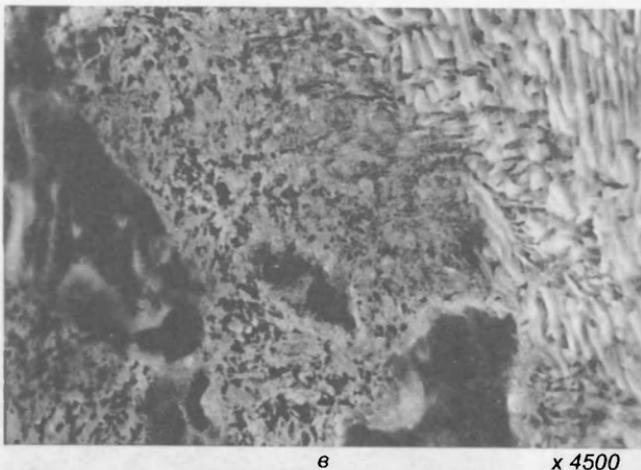
x 400



б

x 4500

Рис. 5.14. Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке с ППД порошка Fe-10%V:
а — оптическая металлография. Поперечный шлиф;
б — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.



в

х 4500

Рис. 5.14 (окончание). Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке с ППД порошка Fe-10%V. Поперечный шлиф: в — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.

- Достаточно высокая плотность и однородность наплавленного покрытия, наличие своеобразной «зеренной» структуры с мелкими (менее 0,1 мкм) порами по границам зерен или ячеек (рис. 5.14, б, в). Соответственно, отсутствует дендритно-столбчатое строение, присущее покрытию, нанесенному без дополнительной пластической обработки.
- Отсутствует четко выраженная поверхность раздела между покрытием и основой, наличие которой характерно при наплавке без ППД (рис. 5.14, а).
- Образование более развитого диффузионного слоя, в котором происходят превращения, соответствующие полной закалке.
- Увеличивается протяженность зоны термического влияния и более глубоко развиваются в ней фазовые превращения как в феррите, так и в перлите. Пористость не превышает 5%.

Для микроструктуры покрытия характерно образование малоуглеродистого мартенсита и наличие структурно-свободного δ -феррита, особенно в участках, прилегающих к основе. На самой границе с основой со стороны покрытия образуется тонкий слой со структурой полной закалки, что связано с диффузией углерода из поверхности основы в жидкую фазу покрытия.

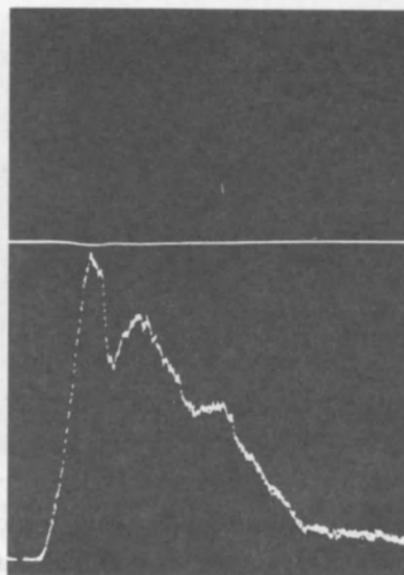
Общая глубина упрочненной зоны при использовании ППД возрастает и достигает 600 мкм. Снижение твердости упрочненного слоя при наложении ППД возможно связано с самоотпуском малоуглеродистого мартенсита при наклепе, вызванном пластической деформацией. Факт интенсивного протекания диффузионных процессов подтверждается данными о распределении ванадия по глубине упрочненного слоя (рис. 5.15, а, б).

Аналогичная картина наблюдается при электромагнитной наплавке с ППД порошка Р6М5ФЗ (рис. 5.16). Увеличивается плотность и однородность самого покрытия. При этом, в отличие от наплавленного слоя, получаемого без ППД, максимальная пористость наблюдается на границе покрытия (рис. 5.16, б), где размер пор не превышает 0,1 мкм. Толщина упрочненного слоя возрастает в основном за счет расширения зоны термического влияния. Причина этого заключается в улучшении условий теплопередачи от наплавляемого металла к основе. Появляется зона полной закалки со структурой мелкоигольчатого мартенсита, твердость которой несколько выше, чем у покрытия. Еще одной особенностью покрытия является его слабая травимость, связанная с повышением плотности дефектов, вводимых в структуру аустенита и формированием на этой основе высокодисперсного дислокационного мартенсита, границы выделений которого не декорированы карбидами. Это обстоятельство (отсутствие выделений карбидной фазы) является одной из причин некоторого снижения твердости покрытия при применении ППД.

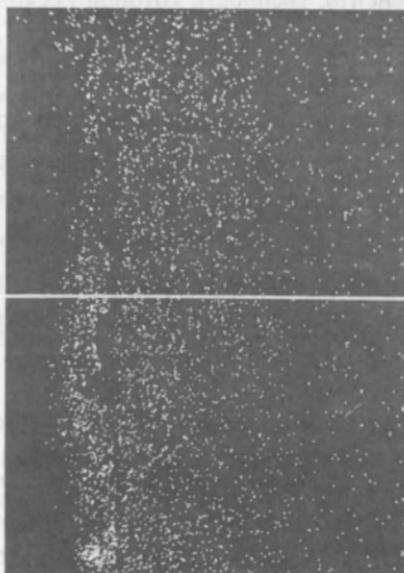
Особенностью структуры (рис. 5.16, а, б, в, г) упрочненного слоя при использовании ППД является также отсутствие четкой границы раздела между покрытием и основой (рис. 5.16, а). Пористость составляет 3—5%.

5.3. Микротвердость покрытий

Известно, что износостойкость материала покрытий в достаточной мере зависит от их микротвердости, хотя условия использования износостойких покрытий часто требуют сочетания износостойкости с другими эксплуатационными параметрами, такими как упругость, прочность на сжатие и изгиб и т. д. Кроме того, по характеру распределения микротвердости можно судить об изменении фазового состава и толщины упрочненной зоны.



а



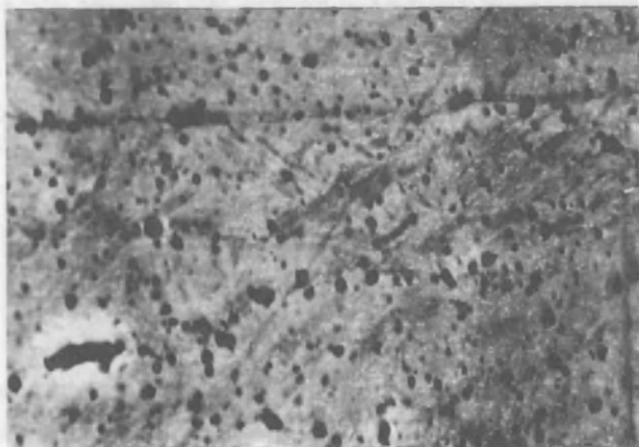
б

Рис. 5.15. Распределение ванадия по глубине упрочненного слоя при электромагнитной наплавке с ППД порошка Fe-10%V: а — кривая распределения концентрации ванадия при сканировании вдоль линии 1—1; б — топография поверхности упрочненного слоя, снятая в характеристическом излучении ванадия.



a

x 400



б

x 4500

Рис. 5.16. Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке с ППД порошка Р6М5Ф3:

a — оптическая металлография. Поперечный шлиф;

б — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.



а

x 4500



б

x 4500

Рис. 5.16 (окончание). Фотографии микроструктуры упрочненного слоя при электромагнитной наплавке с ППД порошка Р6М5Ф3. Поперечный шлиф: а, б — растровая электронная микроскопия различных участков упрочненного слоя.

На рис. 5.17 представлены зависимости изменения величины микротвердости по глубине поверхностного слоя в образцах с покрытиями из порошков $Fe-10\%V$, Р6М5Ф3 и С-300. В приведенных зависимостях четко выделяются три основных участка, отличающиеся характером изменения твердости. Участок А соответствует зоне наплавки и характеризуется незначительными колебаниями твердости по толщине. Твердость наплавленного слоя — примерно от 6000 до 7500 МПа, что соответствует структуре мартенсита. Несколько пониженной твердостью обладает покрытие из сплава С-300, что связано с присутствием определенного количества остаточного аустенита. Твердость покрытий значительно превышает твердость мартенсита при обычной закалке с отпуском. Это связано с получением более дисперсной структуры и более высокой плотности дефектов, чем при обычной термообработке. Максимальная твердость наблюдается при использовании порошка $Fe-10\%V$, что обусловлено отсутствием остаточного аустенита. Толщина слоя покрытия составляет 200—300 мкм.

Участок Б (рис. 5.17) соответствует зоне термического влияния и характеризуется немонотонным изменением твердости, что связано с перераспределением углерода на границе основы и покрытия из-за его повышенной растворимости в жидкой фазе. Аналогичные явления наблюдаются при воздействии на металлические поверхности лазерного излучения. При удалении от поверхности раздела покрытие—основа твердость вначале возрастает в связи с образованием структуры полной закалки, а затем происходит резкое ее снижение до твердости исходного образца (участок В). Некоторые отличия наблюдаются и в упрочненном слое при наплавке порошком С-300, где отмечается увеличение почти в 1,5 раза протяженности зоны Б, которая характеризуется плавным изменением твердости, свидетельствующим о более полном протекании процессов закалки. Это явление следует объяснить более высоким относительным перегревом порошка С-300 при наплавке, так как он имеет пониженную температуру плавления по сравнению с другими исследуемыми материалами. Глубина зоны термического влияния при наплавке порошками $Fe-10\%V$ и Р6М5Ф3 примерно одинакова, а при наплавке порошком С-300 она возрастает.

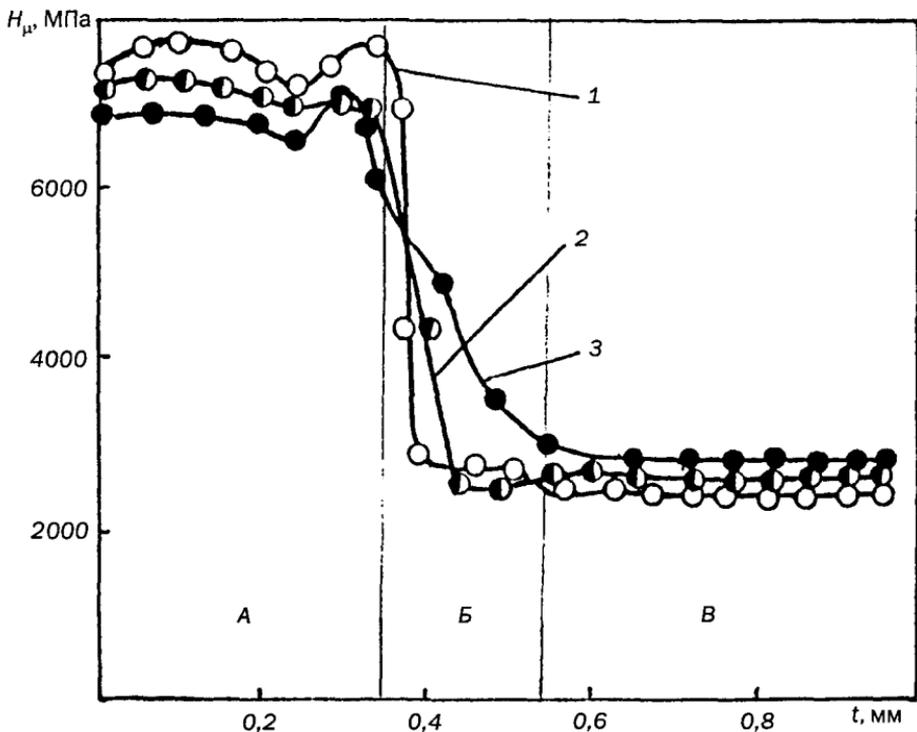


Рис. 5.17. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя при электромагнитной наплавке порошков: 1) Fe-10%V; 2) P6M5Ф3; 3) C-300.

Поверхностная пластическая деформация, изменяя условия формирования покрытия и контакта его на границе с основой, приводит к изменению упорядоченного по толщине распределения упрочненного слоя.

Увеличение толщины упрочненного слоя в этом случае зависит от протяженности зоны термического влияния. Максимальная твердость покрытий, в отличие от предыдущего случая, наблюдается на поверхности, что связано с уменьшением пористости. Твердость покрытия из порошка P6M5Ф3 повышается на 10—15%, что объясняется частичным превращением аустенита в мартенсит, возможным частичным его распадом и выделением дисперсных карбидов. Последнее относится к покрытию из порошка Fe-10% V, в структуре которого не содержится остаточного аустенита, а в результате самоотпуска мартенсита

при использовании ППД происходит значительное снижение твердости. В зоне термического влияния в результате более полного развития процессов закалки твердость возрастает и может превысить твердость покрытия. Для покрытий с ППД характерно более плавное снижение твердости при продвижении вглубь образца и увеличение зоны термического влияния до 200—300 мкм (рис. 5.18).

Графическая зависимость 3 (рис. 5.18) характеризует изменение твердости в поверхностном слое образца после наплавки с ППД порошка Р6М5Ф3 и дополнительного трехкратного отпуска при температуре 500—600 °С. В результате выделения множества дисперсных карбидов твердость покрытия в этом случае увеличивается в 1,5 раза.

5.4. Рентгеноструктурный анализ покрытий

Рентгеноструктурный анализ позволяет по величине физического уширения линии $/211/\alpha$ оценить уровень микронапряжений, дисперсность структуры, содержание углерода в твердом растворе, дислокационную структуру и идентифицировать фазы, находящиеся в покрытии.

Так покрытия, полученные ЭМН порошков Р6М5Ф3 и С-300, имеют два типа пересыщенных твердых растворов с решеткой ОЦК (мартенсит) и ГЦК (аустенит). Покрытие из порошка $Fe-10\%V$ содержит пересыщенный малоуглеродистый высоколегированный твердый раствор с решеткой ОЦК (мартенсит). В табл. 5.2 приведены результаты расчета рентгенограмм для линий $/110/\alpha$, которые смещаются в сторону меньших углов, что связано с повышением плотности дефектов, вводимых в структуру α — твердого раствора.

Табл. 5.2.

Результаты расчета рентгенограмм покрытий.

Расчетные значения железа		Материал покрытий					
		Р6М5Ф3		С-300		Fe-10%V	
θ , град.	d/n	θ , град.	d/n	θ , град.	d/n	θ град.	d/n
Покрытия, полученные ЭМН							
22,4	2,02	22,381	2,026	22,387	2,028	22,384	2,026
Покрытия, полученные ЭМН с ППД							
		22,350	2,028	22,368	2,030	22,358	2,028

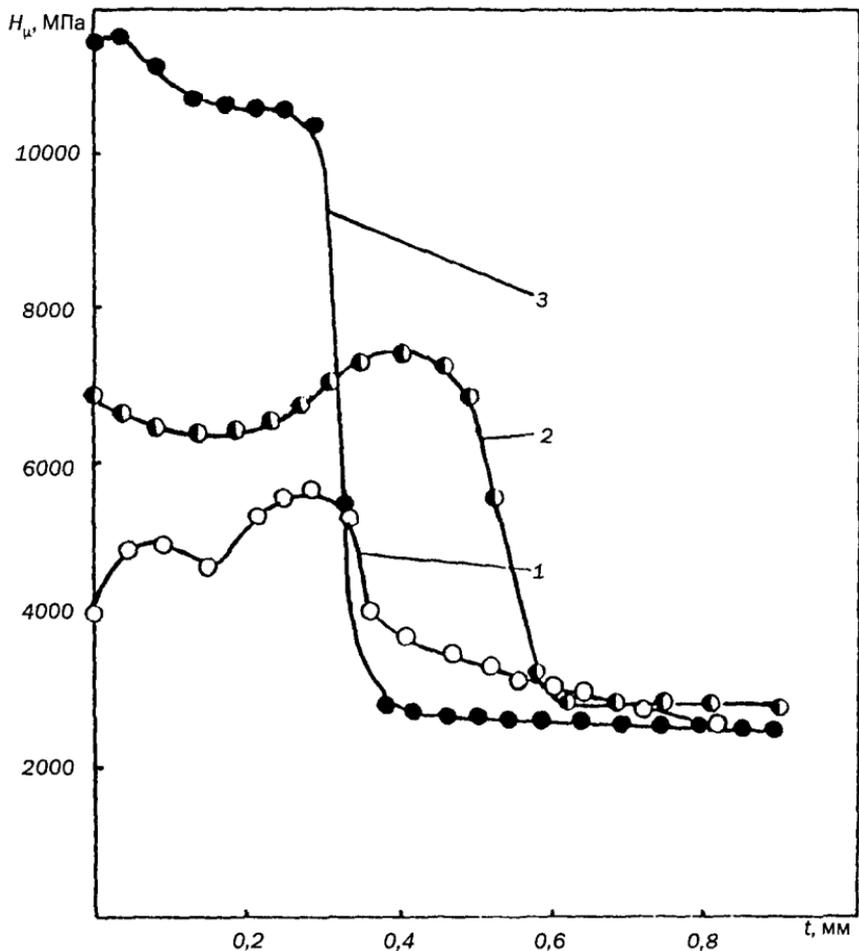


Рис. 5.18. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя при электромагнитной наплавке с поверхностным пластическим деформированием: 1) Fe-10%V; 2) P6M5Φ3; 3) P6M5Φ3 с дополнительным трехкратным отпуском.

Максимальное смещение имеют линии в покрытии, полученном ЭМН с ППД порошка P6M5Φ3. Обусловлено это увеличением содержания углерода и легирующих элементов в твердом растворе. В этом покрытии отсутствует аустенит, так как под влиянием пластической деформации происходит его распад. На штрих-диаграммах рентгеновской съемки (рис. 5.19 и 5.20) покрытий,

полученных ЭМН порошков Р6М5Ф3 и С-300, присутствуют только линии мартенсита и аустенита, причем в покрытии из порошка С-300 доля аустенита больше, чем в покрытии из порошка Р6М5Ф3. Это обусловлено высокой концентрацией углерода, стабилизирующего аустенит. Пластическая деформация высокоуглеродистого аустенита при высоких температурах приводит к повышению плотности дефектов, вводимых в его структуру, в результате чего происходит более полный распад аустенита и, как следствие, повышается твердость покрытия. В структуре покрытия из порошка $Fe-10\%V$ аустенит отсутствует.

Твердость быстрорежущей стали повышается за счет выделения дисперсных карбидов при отпуске. Трехкратный отпуск образцов после ЭМН с ППД порошка Р6М5Ф3 приводит к выделению сложных карбидов хрома и ванадия (рис. 5.21), что обуславливает увеличение плотности и твердости покрытия (рис. 5.18).

Содержание углерода в мартенсита покрытий приведено в табл. 5.3. Практически весь углерод в покрытиях из Р6М5Ф3 и $Fe-10\%V$ находится в твердом растворе. В покрытии из С-300 в мартенсита находится лишь 0,98% углерода, часть его находится в аустените, а остальной — в составе очень дисперсных эвтектических карбидов хрома и ванадия.

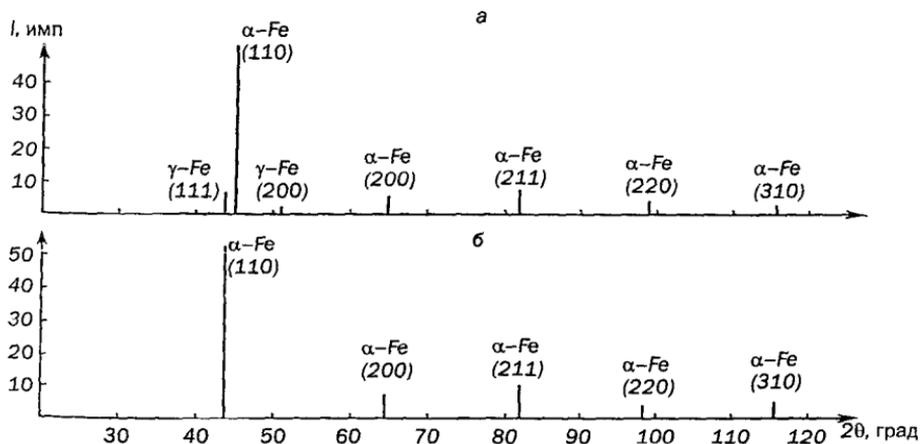


Рис. 5.19. Штрих-диаграмма рентгеновской съемки поверхностного слоя покрытия, полученного электромагнитной наплавкой (а) и электромагнитной наплавкой с ППД порошка Р6М5Ф3 (б).

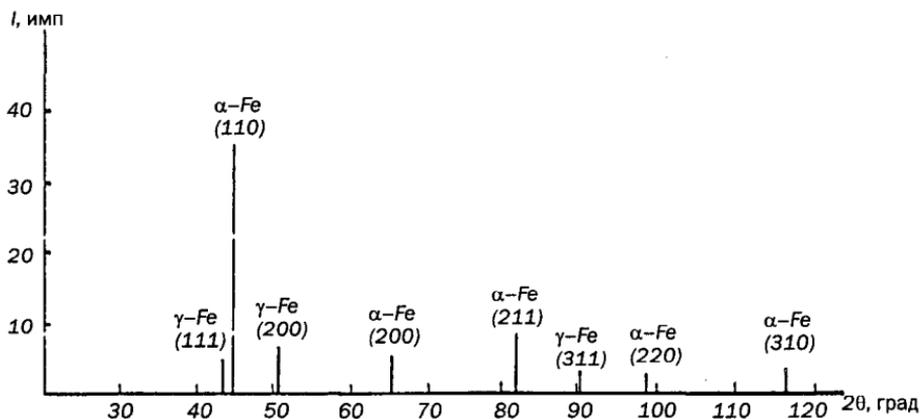


Рис. 5.20. Штрих-диаграмма рентгеновской съемки поверхностного слоя покрытия, полученного электромагнитной наплавкой порошка С-300.

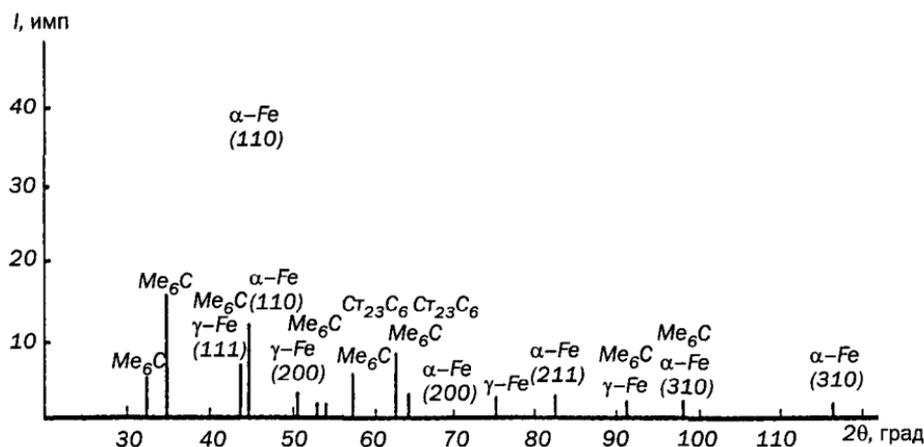


Рис. 5.21. Штрих-диаграмма рентгеновской съемки поверхностного слоя покрытия, полученного электромагнитной наплавкой с ППД и трехкратным отпускком при 560°C порошка Р6М5Ф3.

Расчетные данные размеров блоков когерентного рассеяния и плотности дислокаций приведены в табл. 5.4.

Из приведенных данных видно, что при ЭМН с ППД повышается плотность дефектов, вводимых в структуру мартенсита, а также уменьшаются размеры блоков когерентного рассеяния. Обусловлено это измельчением зерна и повышением плотности дислокаций.

Табл. 5.3.

Параметр решетки и содержание углерода в мартенсите.

Покрытие и метод его получения	Параметр решетки α -фазы, нм	Содержание углерода в мартенсите, %
ЭМН Р6М5Ф3	0,286695	0,900
ЭМН с ППД	0,286793	0,885
ЭМН С-300	0,286610	0,980
ЭМН с ППД	0,286708	0,895
ЭМН Fe-10%V	0,286645	0,232
ЭМН с ППД	0,286712	0,165

Табл. 5.4.

Характеристика тонкой структуры материала покрытий.

Покрытие и метод его получения	Дисперсность блоков когерентного рассеяния D, нм	Физическое уширение линии (211) _{αβ} , рад	Плотность дислокаций ρ , 1/см ²
ЭМН Р6М5Ф3	30,2	$7,26 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{10}$
ЭМН с ППД	20,6	$7,68 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{10}$
ЭМН С-300	17,0	$7,80 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{10}$
ЭМН с ППД	10,8	$7,96 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{10}$
ЭМН Fe-10%V	28,6	$7,46 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{10}$
ЭМН с ППД	19,4	$7,82 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{10}$

Оценка уровня микронапряжений показывает, что они ниже, чем при других методах нанесения покрытий. Это положительным образом характеризует как ЭМН, так и ЭМН с ППД.

5.5. Внутренние остаточные напряжения покрытий

Остаточные напряжения в покрытиях существенно влияют на эксплуатационные свойства восстановленных и упрочненных деталей и прежде всего на их динамическую прочность при циклических нагрузках. Так, остаточные напряжения сжатия являются резервом повышения прочности деталей, а напряжения растяжения ослабляют их прочность, вызывают возникновение трещин, приводят к разрушениям.

Механизм формирования внутренних остаточных напряжений сложен и зависит от соотношения и взаимодействия в покрытии силовых и температурных факторов. При восстановлении или упрочнении деталей ЭМН различными порошками в силу локальных тепловых воздействий на основной металл и быстром неравномерном охлаждении наплавленного покрытия в последнем формируются остаточные напряжения растяжения.

Представляет практический интерес определение остаточных напряжений 1 рода (макронапряжений) в покрытиях, полученных ЭМН с ППД, а также после их механической обработки. Остаточные макронапряжения в покрытиях можно определять рентгеноструктурным анализом, используя метод определения параметров линейно-напряженного состояния металла по смещению линий рентгенограммы.

По закону Гука относительное изменение длины цилиндра при растяжении составляет

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E},$$

где σ — напряжение; E — модуль Юнга.

При этом относительное изменение диаметра цилиндра по закону Пуассона равно

$$\frac{\Delta D}{D} = -\mu \frac{\sigma}{E},$$

где μ — коэффициент Пуассона; D — диаметр цилиндра.

С другой стороны, дифференцирование уравнения Вульфа-Брэггов (при монохроматическом излучении $\lambda = const$) дает

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta \theta}{\theta},$$

где d — расстояние между кристаллографическими плоскостями; θ — угол Вульфа-Брэггов; λ — длина волны рентгеновского луча.

Считая кристаллографические плоскости, участвующие в отражении, параллельными оси цилиндра, можно приравнять

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta D}{D}.$$

Тогда

$$\sigma = -\frac{E}{\mu} \frac{\Delta d}{d} = -\frac{E}{\mu} \Delta \theta \operatorname{ctg} \theta,$$

где $\Delta \theta$ — смещение максимума рентгеновской линии, вызванное макронапряжениями, $\Delta \theta = \theta_{\text{этало́на}} - \theta_{\text{образца}}$.

Разделение K_{α} — дублета и определение точного положения интерференционной линии проводят по методике, в соответствии с которой

$$2 \theta_l = 2 \theta_{\text{ц.т.}} - 0,333 \cdot 2\delta,$$

где θ_l — положение линии K_{α_1} ; $\theta_{\text{ц.т.}}$ — положение центра тяжести профиля; δ — междузублетное расстояние, определяемое из соотношения

$$\delta = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \operatorname{tg} \theta,$$

где $\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda$ — разность длин волн K_{α_1} и K_{α_2} рентгеновских излучений.

Рентгеноструктурный анализ в таких случаях обычно проводят на дифрактометре ДРОН-3 в кобальтовом немонахроматизированном излучении. Съёмка профиля рентгеновской линии выполняется в автоматическом режиме.

Результаты определения остаточных макронапряжений представлены на рис. 5.22. Анализ эпюр распределения остаточных напряжений в покрытиях показывает, что в результате поверхностной пластической деформации

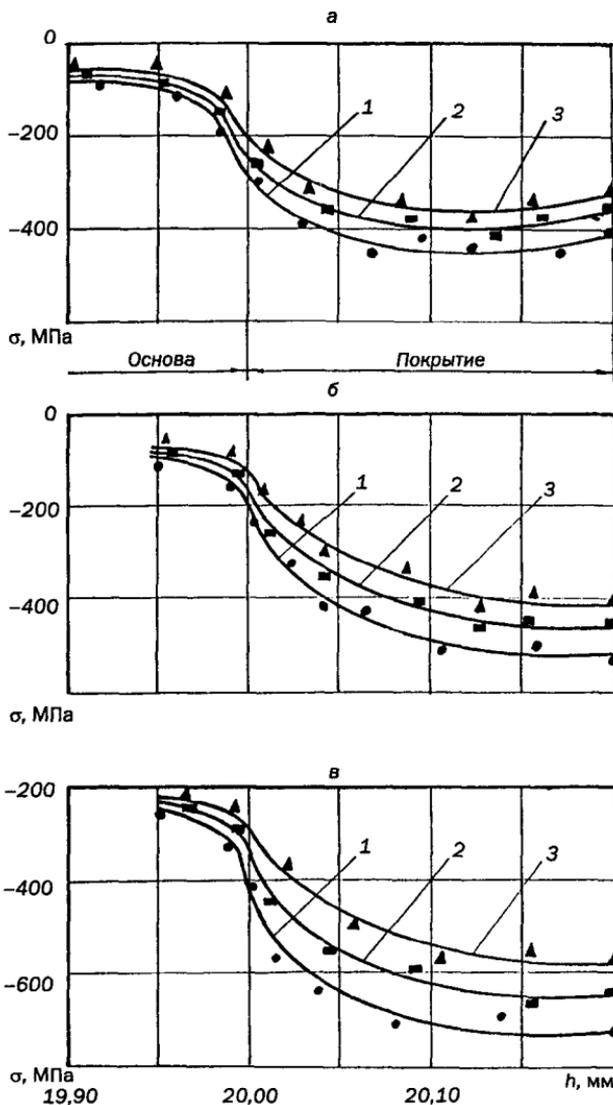


Рис. 5.22. Распределение остаточных напряжений I рода по сечению основы и покрытия, полученного ЭМН с ППД (а); ЭМН с ППД и шлифованием (б); ЭМН с ППД, шлифованием и магнитно-абразивной обработкой (в); 1) Fe-10%V; 2) P6M5Φ3; 3) C-300.

покрытий, изменения удельных объемов при фазовых превращениях, различия коэффициентов линейного расширения материалов порошков и основы в системе покрытие—основа возникают остаточные напряжения сжатия с большим градиентом по глубине деформационного слоя покрытий. Данные рис. 5.22 позволяют сопоставить значения остаточных напряжений в покрытиях в зависимости от химического состава порошков и методов механической обработки. Из рис. 5.22, а следует, что наибольшие остаточные напряжения сжатия имеют покрытия из порошка $Fe-10\%V$, наименьшие — из порошка С-300. Шлифование покрытий приводит, главным образом, к изменению градиента напряжений (рис. 5.22, б). Благоприятное воздействие на остаточные напряжения оказывает магнитно-абразивная обработка, после которой они увеличиваются на поверхности покрытий из порошков $Fe-10\%V$, Р6М5Ф3 и С-300 и соответственно составляют: -730 , -640 и -580 МПа (рис. 5.22, в).

После механической обработки происходит рост остаточных напряжений в покрытии и сдвиг максимума напряжений в глубину. Сравнение эпюр распределения остаточных напряжений показывает, что, начиная с переходной зоны покрытия, они идентичны.

Таким образом, ППД покрытий, полученных ЭМН совместно с ППД, формирует в системе покрытие—основа напряжение сжатия. Шлифование и магнитно-абразивная обработка покрытий увеличивают градиент напряжений. Верхние слои покрытий толщиной до $50-100$ мкм представляют собой зону с большими градиентами напряжений, средние — толщиной $100-200$ мкм — зону с малыми градиентами напряжений.

5.6. Износостойкость покрытий

Физико-механические и эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин, в том числе восстановленных, в значительной степени определяют их надежность и долговечность. В связи с этим придается большое значение обеспечению высокого качества рабочих поверхностей деталей после их восстановления методами наплавки.

Поскольку наплавленный металл отличается неоднородностью структуры и химического состава, наличием сварочных дефектов (пор, трещин,

шлаковых включений и др.), значительными колебаниями твердости, высокой внутренней напряженностью и другими подобными дефектами, представляет большой интерес оценка физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, полученных ЭМН и ЭМН с ППД различных порошков, по их критерию износостойкости. Известно, что скорость изнашивания находится в обратной зависимости от качества поверхностного слоя детали, а качество этого слоя — в прямой зависимости от химического состава материала, микро- и субмикроструктуры. Процессы изнашивания зависят также и от сил трения, о природе которых существует несколько теорий: механическая (теория Амонтона-Кулона), молекулярная (Б. В. Дерягина) и молекулярно-механическая (И. В. Крагельского).

В данной работе представлены результаты износостойкости электромагнитных покрытий, полученных в условиях гидроабразивного изнашивания при трении скольжения на машине 2070 СМТ-1 (рис. 5.23). Количественная оценка износостойкости покрытий осуществлена по схеме «вал—колодка» линейным методом при следующих условиях: удельная нагрузка 3 МПа, относительная скорость скольжения 1,2 м/с, среда — масло индустриальное 20, содержащее 2% карбида бора зернистостью 4—5 мкм. Компоненты и условия испытаний выбирались как наиболее объективно отражающие условия работы ряда деталей сопряжений «вал — подшипник скольжения» сельскохозяйственных, транспортных, дорожно-строительных и ряда других машин, которые обычно выходят из строя по причине абразивного изнашивания.

Износостойкость электромагнитных покрытий определялась на образцах, наплавленных и обработанных при оптимальных условиях и режимах формирования покрытий (образцы после наплавки подвергали абразивному шлифованию и магнитно-абразивной обработке для получения шероховатости поверхности $Ra = 0,63$ мкм) в сопоставлении с эталоном (сталь 45 нормализованная и закаленная на глубину 1,2—1,6 мм до 52—54 HRC). Кроме того, учитывалось, что абразивное изнашивание имеет преимущественно механический характер разрушения поверхности. Интенсивность его при этом в наибольшей степени зависит от твердости сопрягаемых материалов, удельной нагрузки и скорости перемещения.

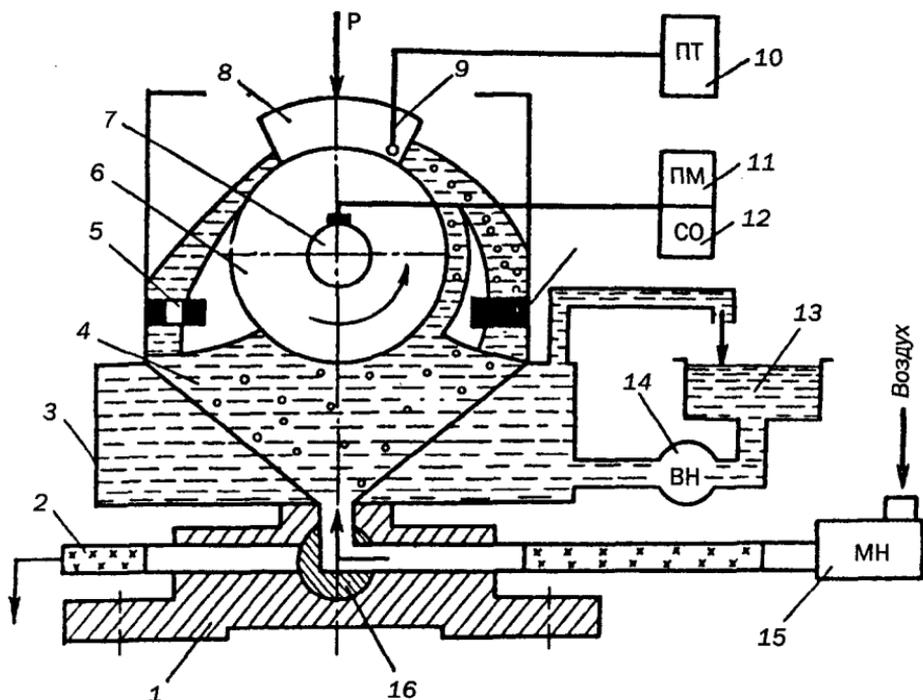


Рис. 5.23. Принципиальная схема установки для испытания материалов на износ в условиях гидроабразивного смазывания: 1 — корпус камеры; 2 — трубка для слива масла; 3 — кожух охлаждения; 4 — камеры для масла; 5 — магнитные пробки; 6 — ролик для испытания на износ; 7 — шпиндель машины; 8 — колодка ролика; 9 — термопара; 10 — потенциометр; 11 — потенциометр для измерения момента трения; 12 — счетчик оборотов ролика; 13 — бак с водой; 14 — водяной насос; 15 — мембранный насос; 16 — трехходовой кран.

Износостойкость покрытий для различных материалов порошков приведена в табл. 5.5 и 5.6. Анализ их показывает, что решающее влияние на износостойкость покрытий оказывает химический и фазовый составы покрытий и метод их нанесения. Так, покрытия, полученные ЭМН с ППД, для всех исследуемых материалов порошков имеют более высокую износостойкость по сравнению с покрытиями, полученными ЭМН. Обусловлено это тем, что ППД повышает плотность и однородность покрытия; воздействует на формирование его структуры, создает ее более дисперсной; приводит к изменению характера распределения упрочненного слоя, в котором происходят превращения,

соответствующие полной закалке; переводит тангенциальные остаточные напряжения растяжения в напряжения сжатия. В связи с этим повышается твердость покрытий и соответственно сопротивление механическому разрушению их поверхности, что и увеличивает износостойкость покрытий.

Наибольшей износостойкостью обладают покрытия из порошков быстрорежущих сталей Р6М5Ф3 и Р6М5К5, а также ферробора ФБ-3 и сплава С-300. Износостойкость этих покрытий значительно выше износостойкости эталона (сталь 45). Так, она в 1,72—2,11 раза больше для ЭМН и в 1,84—2,61 раза — для ЭМН с ППД. Далее в порядке убывания износостойкости следуют покрытия из порошков $Fe-10\%V$ и ПР-Сталь 45-1%В. Износостойкость их по сравнению с эталоном для $Fe-10\%V$ больше в 1,1 и 1,3 раза, для ПР-Сталь 45-1%В — в 1,1 и 1,2 раза соответственно для ЭМН и ЭМН с ППД. Покрытия из порошка $Fe-Ti$, полученные ЭМН и ЭМН с ППД, имеют износостойкость, почти равную эталону. Такую низкую износостойкость по сравнению с остальными составами порошков можно объяснить отсутствием карбидных фаз в структуре покрытия из порошка $Fe-Ti$.

Следовательно, в порядке убывания износостойкости покрытия можно как для ЭМН, так и для ЭМН с ППД расположить в следующей последовательности:

Р6М5Ф3→Р6М5К5→С-300→ФБ-3→ $Fe-10\%V$ →ПР-Сталь45-1%В→ $Fe-Ti$.

Важнейшими показателями качества процессов формирования рабочих поверхностей трения при любых технологических схемах является стабильность и воспроизводимость эксплуатационных свойств изделий. Для ЭМН с ППД разброс данных не превышает 5% и 8% — для ЭМН, что свидетельствует о стабильности параметров процесса электромагнитной наплавки.

Таким образом, износостойкость образцов с покрытиями, полученными ЭМН и ЭМН с ППД, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к деталям сельскохозяйственных, дорожностроительных и транспортных машин, изготовленным из низко- и среднеуглеродистых, а также низколегированных сталей, не подвергаемых упрочнению.

Табл. 5.5.
Износостойкость покрытий, полученных ЭМН,
в условиях гидродразивного изнашивания при трении скольжения.

№ п/п	Материал покрытия	Интенсивность износа вышедшего изнашивания I , мкм/км покрытия	Момент трения $M_{тр}$, Н·м		Коэффициент трения $f_{тр}$	
			Смазочный материал масло И-20	без смазки		Смазочный материал масло И-20
1.	Fe-10%V	3,6	0,99	1,58	0,15	0,24
2.	Fe-Ti	4,5	0,73	1,37	0,11	0,22
3.	C-300	2,2	0,79	1,06	0,12	0,16
4.	P6M5K5	1,9	0,72	0,86	0,11	0,13
5.	P6M5Ф3	2,1	0,73	0,87	0,11	0,13
6.	ПР-Сталь 45-1%B	3,8	0,89	1,37	0,13	0,21
7.	ФБ-3	2,8	0,93	1,10	0,14	0,16
8.	Сталь 45 (эталон)	4,1	0,84	1,26	1,12	0,19

Табл. 5.6.
Износостойкость покрытий, полученных ЭМН с ППД,
в условиях гидродразивного изнашивания при трении скольжения.

№ п/п	Материал покрытия	Интенсивность износа вышедшего изнашивания I , мкм/км покрытия	Момент трения $M_{тр}$, Н·м		Коэффициент трения $f_{тр}$	
			Смазочный материал масло И-20	без смазки		Смазочный материал масло И-20
1.	Fe-10%V	3,1	0,87	1,45	0,13	0,22
2.	Fe-Ti	3,9	0,66	1,32	0,10	0,20
3.	C-300	1,9	0,73	1,00	0,11	0,15
4.	P6M5K5	1,5	0,67	0,79	0,10	0,12
5.	P6M5Ф3	1,7	0,68	0,80	0,10	0,12
6.	ПР-Сталь 45-1%B	3,3	0,72	1,26	0,12	0,19
7.	ФБ-3	2,25	0,90	0,99	0,13	0,15

5.7. Усталостная прочность наплавленных поверхностей

Основная причина разрушения деталей, работающих в условиях циклического нагружения, — усталость металла. Усталостное разрушение начинается в поверхностном слое, от физико-механических свойств которого зависит в значительной степени предел выносливости. Образовавшиеся в покрытиях при ЭМН и ЭМН с ППД металлургические дефекты в виде пор, трещин, остаточных напряжений растяжения и другие, а также при последующей механической обработке покрытий — царапины, риски, мелкие трещины, шлифовальные прижоги резко снижают усталостную прочность. Эти дефекты, являясь в процессе работы детали концентраторами напряжений, образуют очаги зарождения усталостной трещины, которая, разрастаясь, приводит к износу детали.

Структура, фазовый состав и физико-механические свойства гетерогенных покрытий из порошков, полученных ЭМН и ЭМН с ППД, имеют высокую прочность, плотность, однородность, износостойкость. Следовательно, основные эксплуатационные характеристики покрытий могут удовлетворять условиям работы деталей, работающих при циклических нагрузках в условиях трения и изнашивания. Ниже приведены результаты усталостной прочности поверхностей, сформированных ЭМН и ЭМН с ППД. Они получены стандартным методом с построением известной зависимости Велера в координатах σ — $\lg N$, при нагружении в условиях изгиба с вращением консольно закрепленного образца на машине типа У-20М. Критерием выхода из строя являлось разрушение образца под действием знакопеременной нагрузки с постоянной амплитудой.

Образцами служили цилиндрические заготовки из нормализованной стали 45, имеющие соотношение $l/d = 15$, где $l = 150$ мм — длина и $d = 10$ мм — диаметр. Образцы после ЭМН и ЭМН с ППД порошками Р6М5Ф3, С-300 и Fe-10%V обрабатывались абразивным шлифованием и МАО, обеспечивая шероховатость поверхности $Ra = 0,6$ — $0,8$ мкм.

Анализ результатов испытаний, представленных на рис. 5.24, показывает, что при циклическом нагружении образцы с электромагнитным покрытием имеют различную способность к сопротивлению усталостному разрушению. Это объясняется неодинаковой чувствительностью материалов покрытий к дислокационному скольжению, т. е. к процессам, влияющим на усталостное

разрушение. ЭМН порошков С-300 и $Fe-10\%V$ на образцах из стали 45 вызывает снижение сопротивления усталостной прочности последней на 8 и 12% соответственно, а порошка Р6М5Ф3 — увеличение на 8% (рис. 5.24, а).

Снижение предела выносливости наплавленных образцов вызывается рядом причин: наличием дефектов в виде пор и трещин, остаточных напряжений растяжения и др.

Из рис. 5.24, б видно, что усталостная прочность наплавленных поверхностей порошками Р6М5Ф3, С-300 и $Fe-10\%V$ выше эталона соответственно в 1,42; 1,31; 1,19 раз. Обусловлено это тем, что ЭМН с ППД формирует в системе покрытие—основа остаточные напряжения сжатия, увеличивает зону термического влияния, приводит к распаду остаточный аустенит и превращает его в мартенсит с образованием при деформации высокодисперсных карбидов, блокирующих сдвиги по плоскости скольжения. Это в конечном итоге обеспечивает повышение поверхностной прочности, особенно проявляющейся в покрытиях с мартенситно-аустенитной структурой. Кроме того, ППД при ЭМН уменьшает пористость покрытия, что также повышает усталостную прочность наплавленных поверхностей.

Усталостные трещины зарождаются на поверхности и в глубине, т. е. в покрытии и зоне его адгезии с основой. Очаг зарождения трещины зависит от качества покрытия. В покрытиях, полученных ЭМН с ППД, трещины усталостного разрушения, как правило, возникают в зоне сплавления и распространяются по направлению в сторону основы. На изломах почти всех наплавленных и испытанных образцов характерно непостоянство в их месторасположении по длине, что также подтверждает определяющее влияние концентраторов напряжений на усталостную прочность. Все это указывает на то, что при восстановлении и упрочнении ответственных деталей машин, подверженных в эксплуатации воздействию динамических повторно-переменных нагрузок, целесообразно проводить ЭМН с ППД, т. к. последующее упрочнение покрытия ППД (рис. 5.24, б) значительно увеличивает предел усталости.

Наряду с применением ЭМН с ППД для повышения циклической прочности наплавленных поверхностей необходимо совершенствовать технологию наплавки, применяя эффективные порошки, например, Р6М5Ф3, С-300, а также меры, обеспечивающие получение покрытий без сварочных дефектов (пор, трещин и др.).

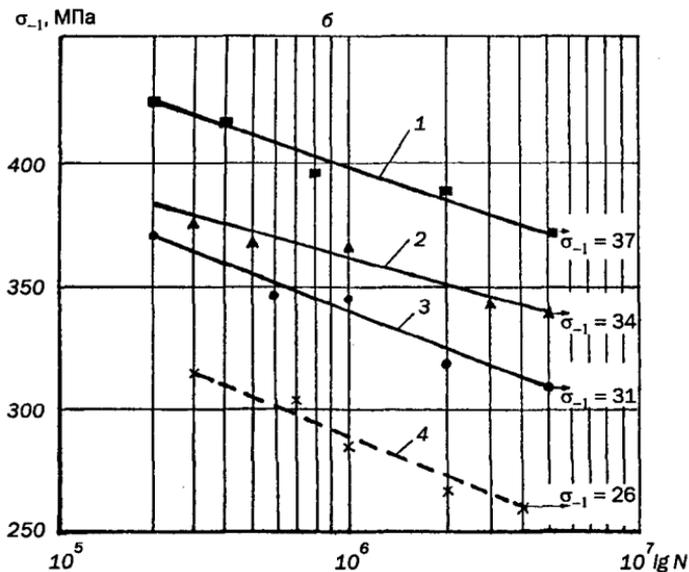
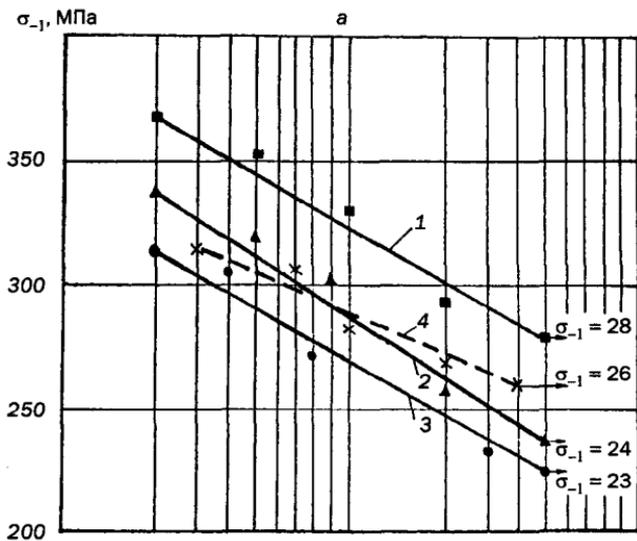


Рис. 5.24. Влияние процесса ЭМН (а), ЭМН с ППД (б) и химического состава порошка на усталостную прочность наплавленных поверхностей:
 1) Р6М5Ф3; 2) С-300; 3) Fe-10%V; 4) Сталь 45.

6. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ

6.1. Математические модели технологического процесса

Теория оптимизации в современном представлении включает в себя совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценки возможных вариантов.

Основной целью любого технологического процесса является обеспечение заданных характеристик качества изделия наиболее производительным путем при минимальных затратах. Отсюда вытекает необходимость использования двух критериев оптимальности: максимальной производительности и минимальной себестоимости.

Для получения моделей ЭМН и ЭМН с ППД износостойких покрытий, по которым оптимизировались процессы, можно применить центральный композиционный ротатабельный униформ-план (ЦКРУП) второго порядка. Исследования подтверждают, что процесс ЭМН можно достаточно полно описывать математическими моделями второго порядка.

Учитывая вид и уровень оптимизации ЭМН и ЭМН с ППД, в качестве параметров многопараметрической оптимизации ЭМН применяют следующие технологические критерии: производительность (увеличение массы покрытия) Δm и сплошность наплавки $K_{сп}$. Для ЭМН с ППД в качестве параметров можно взять следующие эксплуатационные и технологические критерии: относительную износостойкость ϵ , твердость по Роквеллу HRC , среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности Ra и производительность Δm .

Независимыми переменными являются основные факторы технологических режимов. В первом случае плотность разрядного тока i , A/mm^2 ; магнитная индукция в рабочем зазоре B , Т; отношение δ/Δ (δ — рабочий зазор, Δ — зернистость порошка); расход порошка g , $г/(с \cdot мм^2)$; удельная длительность

процесса τ , с/мм²; во втором — усилие деформирования P , Н; скорость подачи S , мм/об; окружная скорость заготовки V , м/с; сила разрядного тока I , А. Указанные факторы определяют процесс формирования и функционирования «многоэлектродной» системы, устойчивость и частоту импульсов разрядного тока в системе, а также то, что они наиболее эффективно влияют на толщину и качественные показатели покрытия.

Для ЭМН оптимальный технологический режим определен для порошков $Fe-10\%V$, $Fe-Ti$, С-300 и Р6М5Ф3, а для комбинированного метода ЭМН с ППД только для порошка $Fe-10\%V$. Условия экспериментов представлены в табл. 6.1 и 6.2.

Обработка результатов опытов, проведенная на ЭВМ по матрицам ЦКРУП второго порядка, позволила получить математические модели, определяющие зависимости исследуемых параметров от технологических факторов ЭМН для различных ферропорошков, а также установить характер зависимостей параметров от технологических факторов ЭМН с ППД для ферропорошка

$Fe-10\%V$.

Статистические модели, определяющие характер зависимости Δm от технологических факторов ЭМН i , B , δ/Δ , g и τ в нормированном виде соответственно X_1 , X_2 , X_3 , X_4 и X_5 для исследуемых порошков, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta m_{FeV} = & 198,20 + 6,67X_1 - 3,17X_2 - 1,50X_3 - 2,92X_4 + \\ & + 1,92X_5 - 1,63X_1X_2 + 5,63X_1X_3 - 2,25X_1X_4 + 1,25X_1X_5^* + \\ & + 1,38X_2X_3 + 0,50X_2X_4^* + 2,25X_2X_5 + 2,75X_3X_4 + 5,00X_3X_5 - \\ & - 1,88X_4X_5 - 2,58X_1^2 - 2,33X_2^2 - 2,83X_3^2 - 3,08X_4^2 - 0,09X_5^{2*}; \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{FeTi} = & 190,50 + 4,59X_1 - 2,67X_2 - 0,92X_3 - 0,92X_4 - \\ & - 0,17X_5^* - 1,63X_1X_2 + 5,88X_1X_3 - 2,00X_1X_4 + 0,63X_2X_3^* - \\ & - 2,00X_2X_4 + 3,25X_2X_5 + 3,75X_3X_4 + 5,25X_3X_5 - 4,38X_4X_5 - \\ & - 2,19X_1^2 - 3,07X_2^2 - 3,44X_3^2 - 3,07X_4^2 - 0,94X_5^{2*}; \end{aligned} \quad (6.2)$$

Табл. 6.1.

Условия экспериментов при ЭМН порошков Fe-10%V, Fe-Ti, C-300, P6M5Ф3.

Уровень факторов	Технологический фактор				
	$i, A/mm^2$	B, T	δ/Δ	$g, g/(c\cdot mm^2)$	$\tau, c/mm^2$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Основной (0)	2,00	0,8	9	$3,0 \cdot 10^{-3}$	0,3
Верхний (+1)	2,33	1,0	11	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,4
Нижний (-1)	1,67	0,6	7	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,2
Звездная точка (+ α)	2,66	1,2	13	$3,8 \cdot 10^{-3}$	0,5
Звездная точка (- α)	1,34	0,4	5	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,1
Интервалы варьирования:					
основной	0,33	0,2	2	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,1
по α	0,66	0,4	4	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,2

Табл. 6.2.

Условия экспериментов при ЭМН с ППД порошка Fe-10%V.

Уровень факторов	Технологический фактор				
	P, H	$S, mm/об$	I, A	$V, м/с$	B, T
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Основной (0)	1000	0,30	100	0,080	0,8
Верхний (+1)	1250	0,42	120	0,091	1,0
Нижний (-1)	750	0,18	80	0,069	0,6
Звездная точка (+ α)	1500	0,54	140	0,102	1,2
Звездная точка (- α)	500	0,06	60	0,058	0,4
Интервалы варьирования:					
основной	250	0,12	20	0,011	0,2
по α	500	0,24	40	0,022	0,4

$$\begin{aligned}
 \Delta m_{C-300} = & 177,90 + 2,71X_1 + 1,54X_2 - 0,79X_3 + 5,30X_4 + 2,96X_5 - \\
 & - 2,19X_1X_2 + 5,56X_1X_3 + 0,63X_1X_4^* - 1,44X_1X_5 + 0,31X_2X_3^* - \\
 & - 2,44X_2X_4 + 4,31X_2X_5 + 1,56X_3X_4 + 5,31X_3X_5 - 3,94X_4X_5 - \\
 & - 2,38X_1^2 - 1,14X_2^2 - 3,63X_3^2 - 4,26X_4^2 - 0,76X_5^2^*; \quad (6.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta m_{P6M5K5} = & 157,30 + 5,67X_1 + 1,92X_2 - 3,67X_3 + 7,17X_4 + 2,42X_5 - \\
 & - 1,13X_1X_2^* + 6,25X_1X_3 - 0,25X_1X_4^* + 0,38X_1X_5^* + 1,00X_2X_3^* - \\
 & - 1,25X_2X_4^* + 3,38X_2X_5 + 2,63X_3X_4 + 5,50X_3X_5 - 3,50X_4X_5 - \\
 & - 2,56X_1^2 - 1,18X_2^2^* - 1,93X_3^2 - 3,68X_4^2 - 0,93X_5^2^*. \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

Модели, определяющие характер зависимости сплошности покрытия от технологических факторов ЭМН для исследуемых порошков, следующие:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{снFe-V}} = & 72,61 + 0,67X_1^* - 0,58X_2^* - 1,84X_3 - 1,17X_4 + 6,59X_5 + \\
 & + 1,50X_1X_3 + 0,38X_1X_4^* + 2,00X_1X_5 + 0,25X_2X_3^* + 1,63X_2X_4 + \\
 & + 0,75X_2X_5^* - 1,13X_3X_4 - 1,00X_3X_5 - 0,63X_4X_5^* - 1,58X_1^2 - \\
 & - 1,71X_2^2 - 2,08X_3^2 - 0,71X_4^2 - 2,96X_5^2;
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}
 K_{\text{снFe-Ti}} = & 66,83 + 1,79X_1 + 0,29X_2^* - 2,54X_3 - 1,21X_4 + 3,71X_5 + \\
 & + 0,69X_1X_2^* + 1,06X_1X_3 + 0,69X_1X_4^* + 1,31X_1X_5 - 0,44X_2X_3^* + \\
 & + 2,19X_2X_4 + 0,31X_2X_5^* - 1,69X_3X_4 - 0,31X_3X_5^* - 1,19X_4X_5 - \\
 & - 1,14X_1^2 - 1,39X_2^2 - 2,27X_3^2 - 0,89X_4^2 - 2,39X_5^2;
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned}
 K_{\text{снС-300}} = & 87,19 - 0,33X_1^* + 2,17X_2 - 3,34X_3 + 1,42X_4 + 5,34X_5 + \\
 & + 0,25X_1X_2^* + 0,25X_1X_3^* + 0,50X_1X_4^* + 1,25X_1X_5 - 0,50X_2X_3^* + \\
 & + 2,00X_2X_4 + 0,75X_2X_5^* - 1,50X_3X_4 - 1,50X_4X_5 - 2,75X_1^2 - \\
 & - 1,25X_2^2 - 3,25X_3^2 - 3,13X_4^2 - 1,75X_5^2;
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

$$\begin{aligned}
 K_{\text{снP6M5K5}} = & 84,78 + 0,17X_1^* + 3,51X_2 - 4,67X_3 + 1,84X_4 + 5,42X_5 + \\
 & + 0,13X_1X_2^* + 0,50X_1X_3^* + 0,38X_1X_4^* + 1,38X_1X_5 + 1,13X_2X_3 + \\
 & + 1,50X_2X_4 + 0,50X_2X_5^* - 1,13X_3X_4 + 0,62X_3X_5^* - 1,75X_4X_5 - \\
 & - 2,71X_1^2 - 1,58X_2^2 - 2,21X_3^2 - 2,58X_4^2 - 2,21X_5^2.
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

Модели, определяющие характер зависимостей ϵ , $HRC_{\text{с}}$, Ra и Δm^l от технологических факторов ЭМН с ППД P , S , I , V и B в нормированном виде соответственно X_1 , X_2 , X_3 , X_4 и X_5 , для порошка $Fe-10\%V$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1,43 + 0,28X_1 - 0,13X_2 + 0,37X_3 + 0,08X_4^* + 0,14X_5 - \\ & - 0,68X_1X_2 + 0,13X_1X_3 - 0,21X_1X_4 + 0,08X_1X_5^* - 0,15X_2X_3 + \\ & + 0,37X_2X_4 + 0,14X_2X_5 - 0,12X_3X_4 - 0,19X_3X_5 + 0,02X_4X_5^* - \\ & - 0,15X_1^2 - 0,15X_2^2 - 0,10X_3^2 - 0,02X_4^2^* - 0,01X_5^2^*; \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} HRC = & 40,51 + 1,33X_1 + 0,58X_2 + 1,84X_3 + 0,08X_4^* + 1,50X_5 - \\ & - 0,38X_1X_2 + 1,13X_1X_3 + 0,88X_1X_4 + 1,50X_1X_5 + 0,75X_2X_3 + \\ & + 0,25X_2X_4^* + 1,63X_2X_5 - 0,75X_3X_4 - 0,88X_3X_5 - 0,13X_4X_5^* - \\ & - 0,58X_1^2 - 0,16X_2^2^* - 1,06X_3^2 - 0,03X_4^2^* - 0,59X_5^2; \end{aligned} \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned} Ra = & 7,05 - 0,37X_1 + 0,46X_2 - 0,45X_3 - 0,35X_4 + 0,26X_5 - \\ & - 0,43X_1X_2 + 0,35X_1X_3 + 0,07X_1X_4^* + 0,29X_1X_5 - 0,42X_2X_3 + \\ & + 0,90X_2X_4 + 0,34X_2X_5 - 0,87X_3X_4 - 0,44X_3X_5 - 0,15X_4X_5^* - \\ & - 0,47X_1^2 + 0,09X_2^2^* + 0,21X_3^2 + 0,07X_4^2^* + 0,22X_5^2; \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} \Delta m' = & 0,34 + 0,002X_1 - 0,074X_2 - 0,002X_3 - 0,014X_4 + 0,023X_5 - \\ & - 0,002X_1X_2^* + 0,002X_1X_3^* - 0,007X_1X_4 + 0,013X_1X_5 + 0,011X_2X_3 - \\ & - 0,002X_2X_4^* + 0,006X_2X_5 - 0,012X_3X_4 + 0,008X_3X_5 - 0,004X_4X_5 - \\ & - 0,001X_1^2^* - 0,015X_2^2 - 0,023X_3^2 - 0,005X_4^2 - 0,008X_5^2. \end{aligned} \quad (6.12)$$

Установлено, что не все коэффициенты регрессий (6.1) — (6.12) значимы с 90-процентной доверительной вероятностью по критерию Стьюдента (* — коэффициент не значим). Также установлено, что все модели адекватны при 5-процентном уровне значимости по критерию Фишера.

Таким образом, получены модели ЭМН (6.1) — (6.8) для различных порошков, а также модели ЭМН с ППД (6.9) — (6.12) для порошка $Fe-10\%V$, которые позволяют установить степень влияния технологических факторов на параметры процессов и определить оптимальные режимы наплавки.

6.2. Влияние технологических факторов на основные показатели процессов

Электромагнитная наплавка. Влияние технологических факторов ЭМН на Δt и $K_{\text{сп}}$ определяют по математическим моделям (6.1) — (6.8), геометрическая интерпретация которых представлена в виде одномерных сечений в двумерной системе координат (рис. 6.1 — 6.5). Зависимости, представленные на рис. 6.1 — 6.5, находятся в факторном пространстве, так как пределы экстраполяции были ограничены условием $-2 < X_i < +2$.

Анализ моделей (6.1) — (6.8) показывает, что технологические факторы по-разному влияют на параметры процесса. Кроме того, видно, что технологические факторы при наплавке покрытий различными порошками также оказывают существенное влияние на параметры процесса. Поэтому исследуемые порошки разделили на две группы. К первой группе отнесли порошки $Fe-V$ и $Fe-Ti$, второй — С-300 и Р6М5К5. Разделение порошков на группы по степени влияния технологических факторов на параметры процесса обусловлено их магнитными свойствами. Порошки $Fe-V$ и $Fe-Ti$ представляют собой частицы железа, покрытые пленкой из оксидов и карбидов, причем процент легирующих элементов незначителен. Порошки С-300 и Р6М5К5 содержат значительное количество неферромагнитных элементов и химических соединений (карбидов), поэтому их магнитные свойства значительно ниже, чем порошков первой группы.

Установлено, что при наплавке порошков первой группы наибольшее влияние на производительность процесса Δt оказывает плотность разрядного тока i , при наплавке порошков второй группы — расход порошка g и наименьшая величина δ/Δ . Влияние технологических факторов на сплошность покрытия $K_{\text{сп}}$ для порошков первой группы в порядке убывания их значимости можно расположить в следующий ряд:

$$\tau \rightarrow \delta/\Delta \rightarrow g \rightarrow i \rightarrow B.$$

Для порошков второй группы —

$$\tau \rightarrow \delta/\Delta \rightarrow B \rightarrow g \rightarrow i.$$

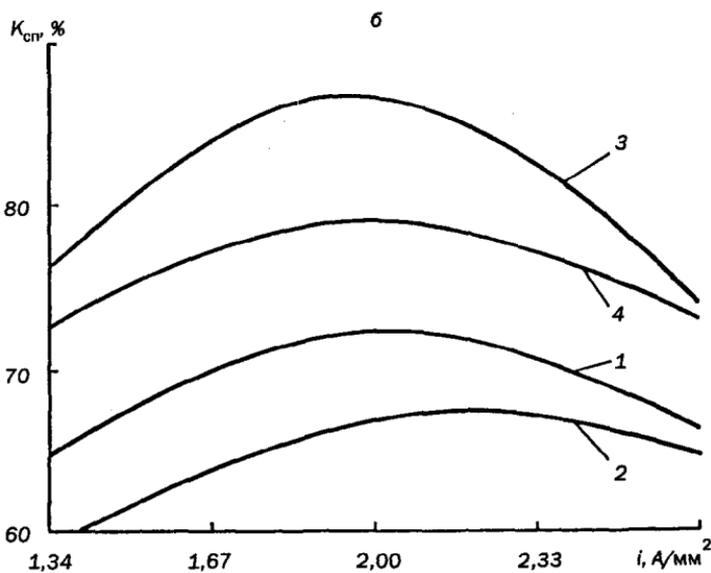
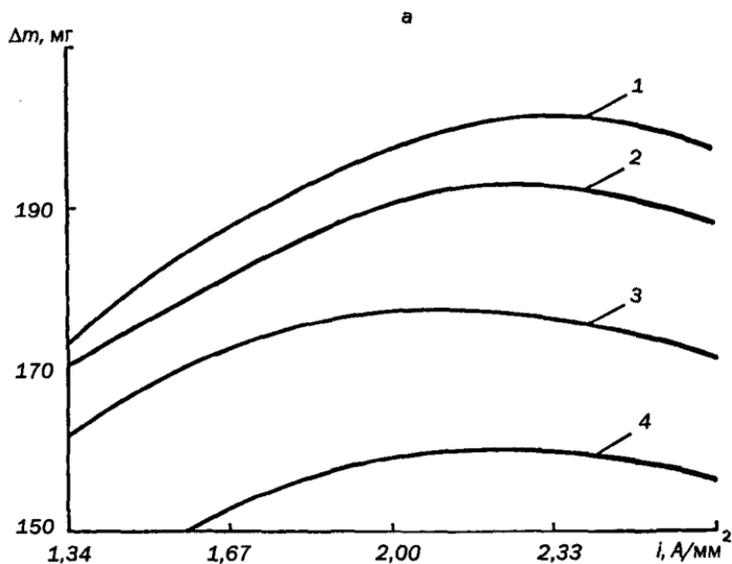


Рис. 6.1. Зависимость производительности Δm (а) и сплошности покрытия $K_{ср}$ (б) от плотности разрядного тока i при электромагнитной наплавке порошков: 1) Fe-10%V; 2) Fe-Ti; 3) С-300; 4) Р6М5К5.

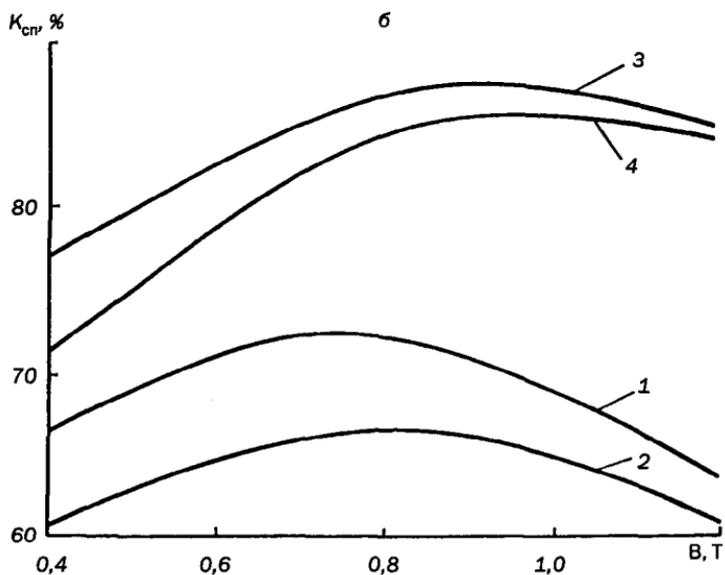
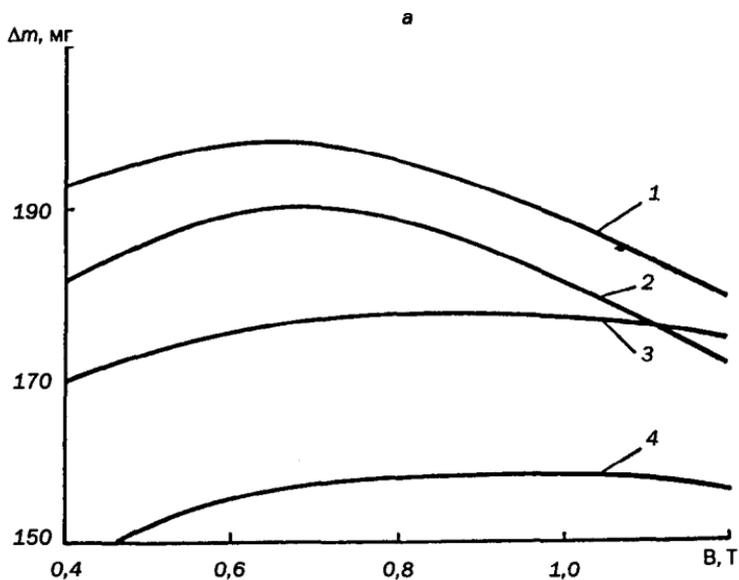


Рис. 6.2. Зависимость производительности Δm (а) и сплошности покрытия $K_{\text{ср}}$ (б) от магнитной индукции в рабочем зазоре B при электромагнитной наплавке порошков: 1) Fe-10%V; 2) Fe-Ti; 3) C-300; 4) P6M5K5.

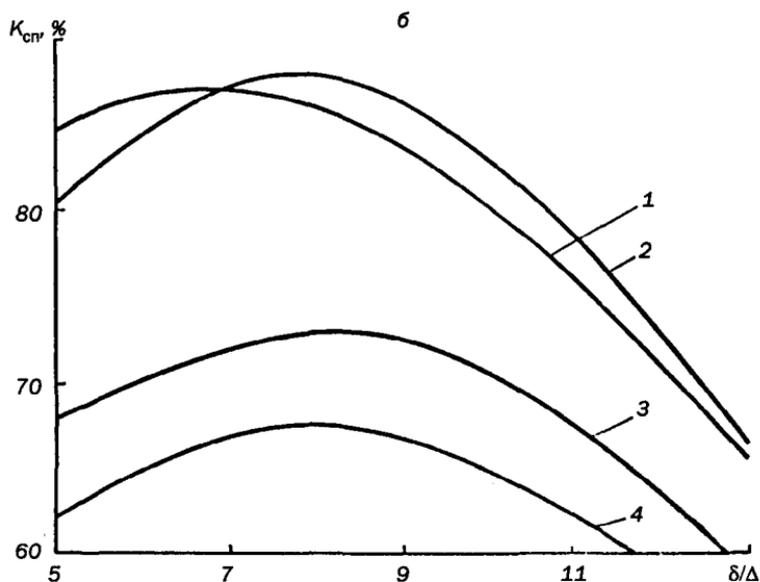
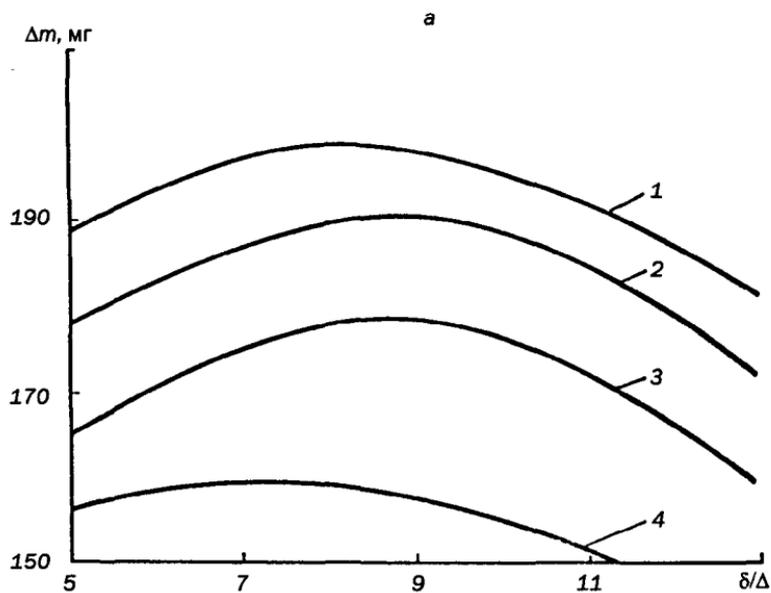


Рис. 6.3. Зависимость производительности Δm (а) и сплошности покрытия $K_{сн}$ (б) от соотношения δ/Δ при электромагнитной наплавке порошков: 1) Fe-10%V; 2) Fe-Ti; 3) С-300; 4) P6M5K5.

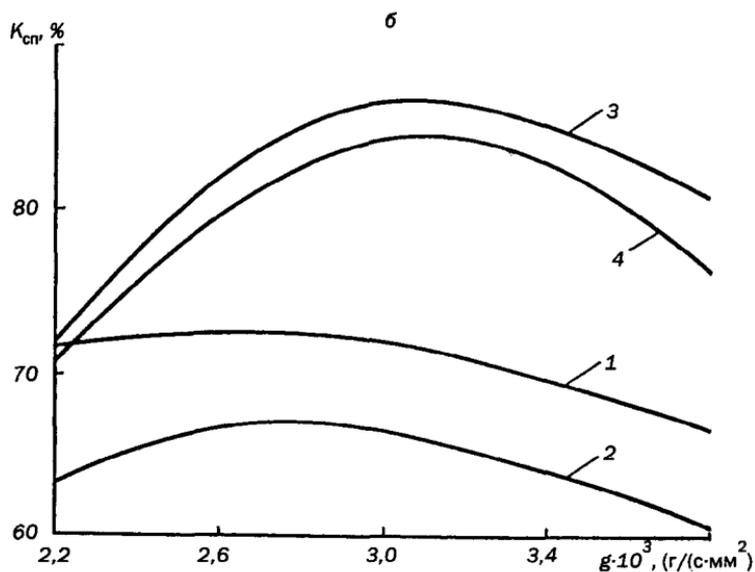
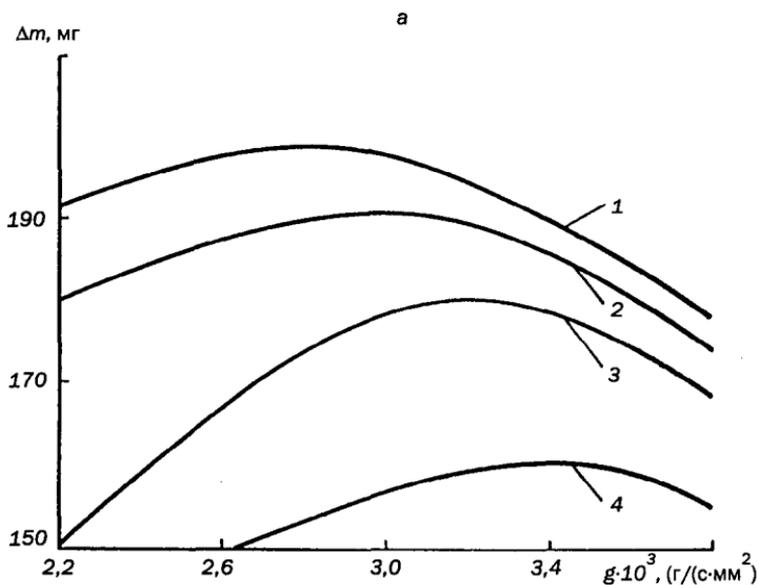


Рис. 6.4. Зависимость производительности Δm (а) и сплошности покрытия $K_{сн}$ (б) от расхода порошка g при электромагнитной наплавке порошков:
 1) Fe-10%V; 2) Fe-Ti; 3) C-300; 4) P6M5K5.

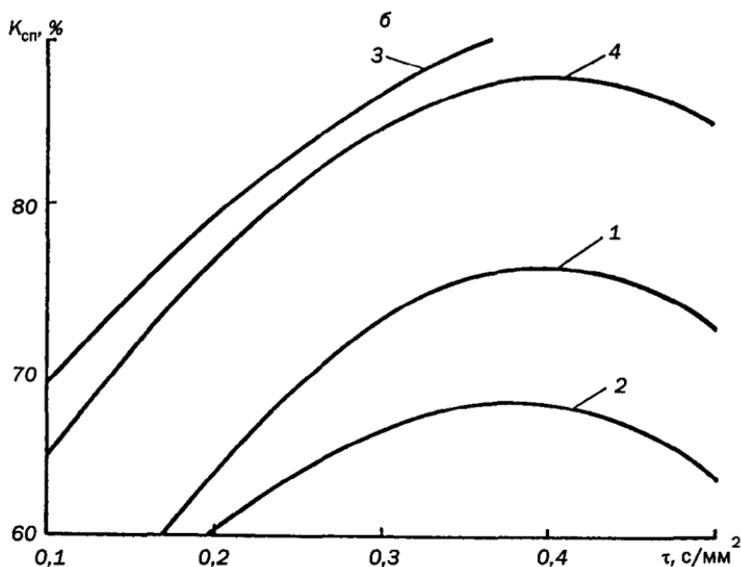
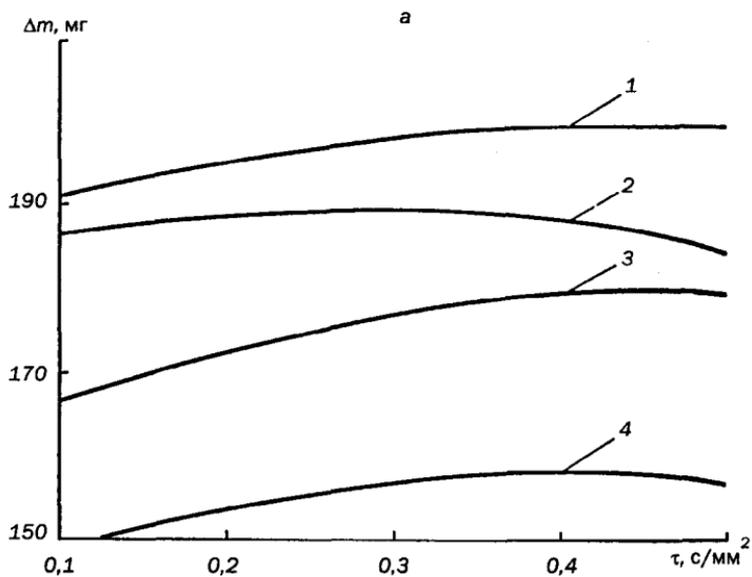


Рис. 6.5. Зависимость производительности Δm (а) и сплошности покрытия $K_{сн}$ (б) от удельной длительности τ при электромагнитной наплавке порошков: 1) Fe-10%V; 2) Fe-Ti; 3) С-300; 4) P6M5K5.

Плотность разрядного тока оказывает решающее влияние на производительность наплавки и незначительное — на сплошность. При увеличении i производительность возрастает, так как нагрев и расплавление порошка возрастает за счет преобразования электрической энергии в тепловую. Однако при достижении значения $i > i_m$ (рис. 6.1) производительность процесса снижается, так как повышается вероятность возникновения электрического разряда у поверхности полюсного наконечника из-за увеличения коэффициента передачи энергии. Значение i_m для исследуемых порошков различно: $i_{mFe-V} = 2,43$ А/мм²; $i_{mFe-Ti} = 2,35$ А/мм²; $i_{mC-300} = 2,19$ А/мм²; $i_{mP6M5K5} = 2,37$ А/мм². Увеличение в составе порошка тугоплавких составляющих — карбидов ванадия, молибдена, вольфрама, титана ведет к повышению i_m . Зависимость $K_{сн} = f(i)$ также носит экстремальный характер. При достижении значения $i > i_{K_{сн}}$ силы взаимодействия токов, протекающих в порошке и цепочках-электродах, снижают их устойчивость и могут разрушить последние еще до расплавления зерен порошка. Значение $i_{K_{сн}}$ для исследуемых порошков: $i_{K_{сн}Fe-V} = 2,07$ А/мм²; $i_{K_{сн}Fe-Ti} = 2,26$ А/мм²; $i_{K_{сн}P6M5K5} = 1,99$ А/мм².

Магнитная индукция в рабочем зазоре влияет не только на интенсивность образования цепочек-электродов, их устойчивость и электрическую проводимость, но и на распределение расплава порошка и эрозию наплавленного покрытия. Как видно из рис. 6.2, зависимости $\Delta t = f(B)$ и $K_{сн} = f(B)$ носят экстремальный характер для порошков $B_{mFe-V} = 0,66$ Т; $B_{mFe-Ti} = 0,71$ Т; $B_{mC-300} = 0,94$ Т; $B_{mP6M5K5} = 0,96$ Т; $B_{K_{сн}Fe-V} = 0,77$ Т; $B_{K_{сн}Fe-Ti} = 0,82$ Т; $B_{K_{сн}C-300} = 0,97$ Т; $B_{K_{сн}P6M5K5} = 1,02$ Т.

Соотношение δ/Δ , физический смысл которого состоит в том, что оно определяет количество зерен порошка, образующих цепочку-электрод, при малых значениях оказывает незначительное влияние на Δt и $K_{сн}$ (рис. 6.3). Обусловлено это образованием большого количества цепочек-электродов за счет закалывания и удержания магнитным полем порошка в рабочем зазоре. При этом снижается количество тепловой энергии, передаваемой каждой цепочке-электроду, а следовательно, и перенос материала порошка на обрабатываемую поверхность. Сплошность покрытия невелика из-за повышенной

устойчивости коротких цепочек-электродов и эрозии покрытия. С увеличением соотношения δ/Δ количество цепочек-электродов уменьшается, а их подвижность увеличивается, что повышает вероятность возникновения дугового разряда на новых участках наплавляемой поверхности. При значениях $\delta/\Delta > \delta/\Delta m$ и $\delta/\Delta > \delta/\Delta_{\text{Ксн}}$ производительность и сплошность наплавки снижаются из-за чрезмерной длины цепочек-электродов (рис. 6.3). Для исследуемых порошков значения $\delta/\Delta m$ и $\delta/\Delta_{\text{Ксн}}$ следующие: $\delta/\Delta m_{\text{Fe-V}} = 8,47$; $\delta/\Delta m_{\text{Fe-Ti}} = 8,73$; $\delta/\Delta m_{\text{C-300}} = 8,78$; $\delta/\Delta m_{\text{P6M5K5}} = 7,10$; $\delta/\Delta_{\text{КснFe-V}} = 8,12$; $\delta/\Delta_{\text{КснFe-Ti}} = 7,88$; $\delta/\Delta_{\text{КснC-300}} = 7,97$; $\delta/\Delta_{\text{КснP6M5K5}} = 6,88$. Как видно, значения δ/Δ для порошков и параметров наплавки отличаются незначительно.

Расход порошка является одним из важнейших технологических факторов, оказывающих наибольшее влияние на производительность при наплавке порошков с высоким содержанием легирующих элементов (рис. 6.4). Объясняется это тем, что замыкание электрической цепи происходит не только за счет удержания зерен порошка магнитным полем, но и за счет заклинивания их в рабочем зазоре.

Зависимости $\Delta m = f(g)$ и $K_{\text{сн}} = f(g)$ носят экстремальный характер. Так при увеличении расхода порошка до определенной величины в рабочей зоне образуется большое количество цепочек-электродов, что приводит к повышению производительности и сплошности наплавки. Однако по причинам, аналогичным влиянию магнитной индукции B и соотношения δ/Δ , расход порошка имеет ограничение. Наиболее благоприятные значения расхода порошков, обеспечивающие наибольшую производительность и сплошность покрытия, следующие:

$$\begin{array}{ll}
 g_{\text{Fe-V}} = 2,67 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); & g_{\text{Fe-Ti}} = 2,73 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); \\
 g_{\text{C-300}} = 3,07 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); & g_{\text{P6M5K5}} = 3,14 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); \\
 g_{\text{КснFe-V}} = 2,81 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); & g_{\text{КснFe-Ti}} = 2,94 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); \\
 g_{\text{КснC-300}} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2); & g_{\text{КснP6M5K5}} = 3,39 \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2).
 \end{array}$$

Из приведенных данных следует, что значения расхода порошков отличаются незначительно (рис. 6.4).

Длительность наплавки (рис. 6.5) в первую очередь определяет сплошность покрытия, так как при увеличении τ возрастает вероятность возникновения электрического разряда на большей площади наплавляемой поверхности. С увеличением времени наплавки производительность и сплошность покрытия возрастают и, достигнув максимального значения, уменьшаются. Обусловлено это эрозией наплавляемого слоя в связи с концентрацией магнитных силовых линий у выступающих частей профиля покрытия, приводящие к уменьшению тепло-, электро- и магнитопроводности, что и способствует разрушению образовавшегося слоя покрытия.

Установлены следующие наиболее эффективные значения удельной длительности наплавки для порошков:

$$\begin{aligned} \tau_{mFe-V} &= 0,411 \text{ с/мм}^2; & \tau_{mFe-Ti} &= 0,291 \text{ с/мм}^2; \\ \tau_{mC-300} &= 0,457 \text{ с/мм}^2; & \tau_{mP6M5K5} &= 0,430 \text{ с/мм}^2; \\ \tau_{KcnFe-V} &= 0,405 \text{ с/мм}^2; & \tau_{KcnFe-Ti} &= 0,378 \text{ с/мм}^2; \\ \tau_{KcnC-300} &= 1,520 \text{ с/мм}^2; & \tau_{KcnP6M5K5} &= 0,423 \text{ с/мм}^2. \end{aligned}$$

Метод электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием. Влияние технологических факторов ЭМН с ППД на ϵ , $HRC_{\text{с}}$, Ra и $\Delta m'$ определялось также по математическим моделям (6.9)—(6.12), геометрическая интерпретация которых, как и для ЭМН, представлена в виде одномерных сечений в двумерной системе координат (рис. 6.6—6.8). Зависимости, показанные на рис. 6.6—6.8, также находятся в факторном пространстве, так как пределы экстраполяции были ограничены условием $-2 < X_i < +2$.

Анализ результатов исследований (рис. 6.6—6.8) показывает, что зависимость параметров процесса от технологических факторов носит экстремальный характер, обусловленный совместным действием электрической, магнитной, тепловой и механической энергиями при формировании покрытий. Полученные математические модели (6.9)—(6.12) позволяют выявить степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации. С учетом уровня значимости факторы можно расположить в ряды в порядке убывания влияния на оптимизируемые параметры (рис. 6.9).

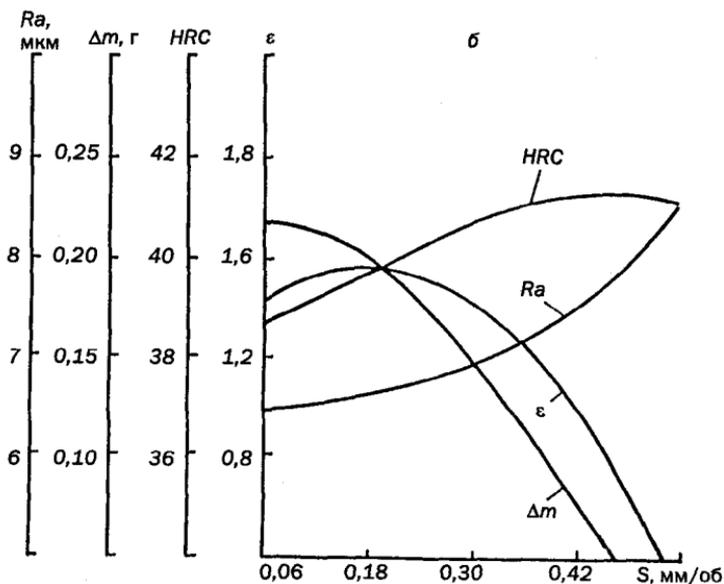
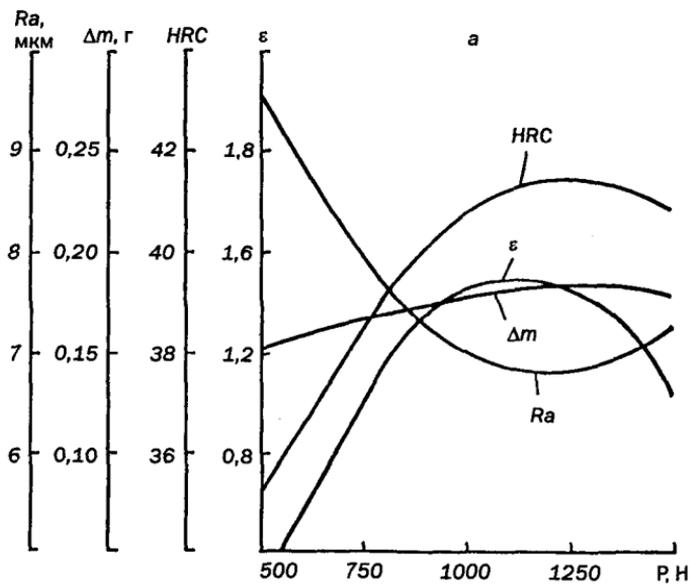


Рис. 6.6. Зависимость шероховатости поверхности Ra , производительности $\Delta m'$, твердости поверхностного слоя HRC , относительной износостойкости ϵ от усилия деформирования P (а) и подачи S (б).

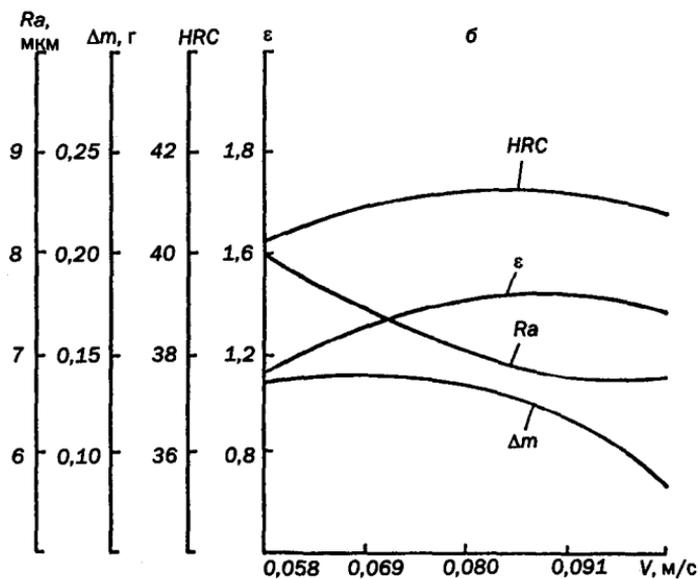
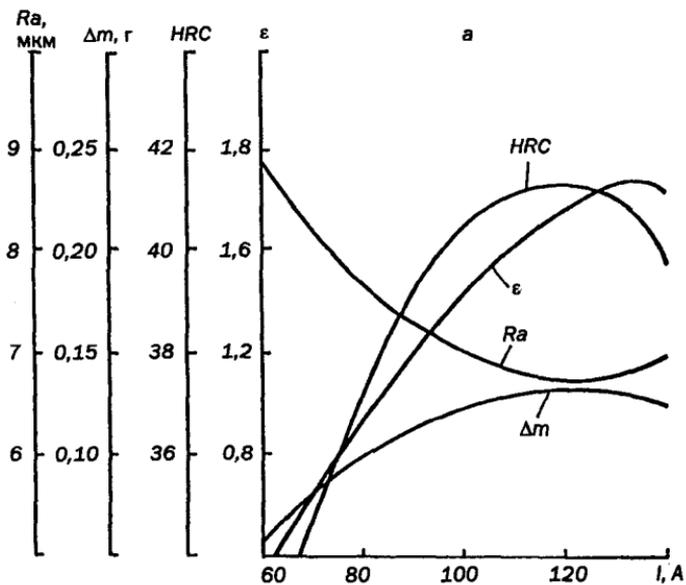


Рис. 6.7. Зависимость шероховатости поверхности Ra , производительности $\Delta m'$, твердости поверхностного слоя HRC , относительной износостойкости ϵ от разрядного тока I (а) и окружной скорости заготовки V (б).

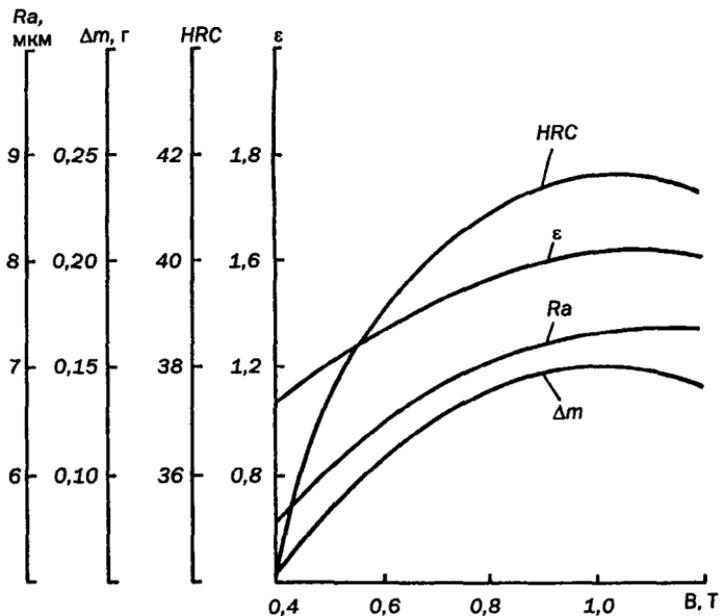


Рис. 6.8. Зависимость шероховатости поверхности Ra , производительности $\Delta m'$, твердости поверхностного слоя HRC, относительной износостойкости ε от магнитной индукции в рабочем зазоре B .

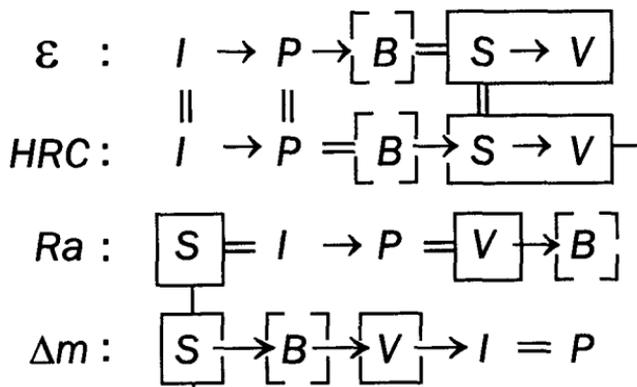


Рис. 6.9. Последовательность и значимость влияния технологических факторов метода электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием на параметры оптимизации.

Из анализа (рис. 6.6—6.8) видно, что влияние технологических факторов I , P , B , S и V на относительную износостойкость ϵ и твердость HRC покрытия во многом схоже. Это объясняется тем, что для износостойких материалов наблюдается в основном линейная зависимость между HRC и ϵ . На ϵ и HRC наибольшее влияние оказывает сила разрядного тока I , далее в порядке убывания значимости следуют усилие ППД P , магнитная индукция B и заканчивают ряд скорости подачи S и вращения V детали. Как установлено выше, значение I , задавая количество теплоты, подводимое в зону наплавки, определяет фазовые и структурные превращения в покрытии и основе, а также глубину диффузии элементов порошка в материал основы. С ростом усилия P увеличивается степень деформации и, следовательно, твердость HRC покрытия. Значение магнитной индукции B в рабочей зоне влияет на процесс формирования цепочек-электродов и совместно с I определяет время существования электрического разряда, чем и объясняется его воздействие на величины ϵ и HRC. Влияние скоростей S и V на ϵ и HRC невелико.

Наибольшее влияние на шероховатость поверхности Ra оказывает продольная подача S , далее аналогично влиянию на ϵ и HRC следуют I и P , а завершает ряд, в отличие от влияния на ϵ и HRC, магнитная индукция B . Это происходит потому, что помимо рассмотренных выше тепловых и деформационных процессов при формировании рельефа поверхности особую роль играют формообразующие движения S и V , связанные так же с поглощением тепла деталью и перекрытием контактных площадок при деформировании поверхности.

На производительность процесса ЭМН $\Delta m'$ наибольшее влияние оказывают скорости V и, особенно, S совместно с индукцией B . Производительность ЭМН с ППД, связь Ra и HRC в технологической системе осуществляется с учетом магнитной индукции в рабочем зазоре B , формообразующих движений V и S заготовки и диаметра шарика. Это приводит к тому, что при формировании шероховатости поверхности Ra тепловой и деформационный факторы тесно взаимодействуют и приближаются по значимости к факторам, определяющим производительность процесса, — S , V и B (рис. 6.9).

6.3. Оптимизация технологических факторов

Многопараметрическую оптимизацию технологических факторов процессов ЭМН и ЭМН с ППД проводили по математическим моделям (6.1) — (6.12) методом спирального координатного спуска по разработанной программе с использованием ЭВМ. Для ЭМН в качестве параметров приняты $Y_1 = \Delta m$ и $Y_2 = K_{\text{сп}}$, а для ЭМН с ППД — $Y_1 = \varepsilon$, $Y_2 = \text{HRC}$, $Y_3 = Ra$, $Y_4 = \Delta m'$ и комплексы параметров $Y_5 = (\text{HRC}, Ra, \Delta m')$ и $Y_6 = (\varepsilon, \text{HRC}, Ra, \Delta m')$. В качестве комплексного показателя D использовали обобщенную функцию желательности Харрингтона.

Для желательности d_i ЭМН и ЭМН с ППД построены шкалы (рис. 6.10 и 6.11), исходя из требований, предъявляемых к обработанной поверхности в процессе эксплуатации. Поэтому на технологические факторы процессов были наложены ограничения.

Так, важным фактором, заметно расширяющим технологические возможности ЭМН с ППД, является усилие деформирования. При увеличении его до $P = 1000$ Н происходит уменьшение шероховатости поверхности, повышение твердости, износостойкости и производительности (рис. 6.6, а). Дальнейшее увеличение почти не изменяет шероховатость и твердость. Но при $P > 1300$ Н наблюдается снижение твердости, увеличение шероховатости. В поверхностном слое покрытия при этом возникают напряжения, при которых начинается его разрушение, что сопровождается шелушением поверхности. Анализ зависимостей (рис. 6.6, а) дает основание считать, что наиболее эффективно усилие деформирования при соблюдении условия $900 < P < 1200$ Н.

Разрядный ток I оказывает наибольшее влияние на износостойкость и твердость покрытия (рис. 6.9). При значениях $I < 60 < A$ насыщение происходит реактивно, формируется покрытие недостаточной толщины и качества. С увеличением тока повышается мощность разряда, что приводит к росту толщины покрытия (производительности) (рис. 6.7, а). Однако при $I > 140 > A$ наблюдается перегрев поверхности вплоть до оплавления участков заготовки, процесс напоминает электродуговую наплавку. Анализ зависимостей, представленных на рис. 6.7, а, показывает, что наиболее интенсивно осуществляется процесс наплавки, когда выполняется условие $95 < I < 125 A$.

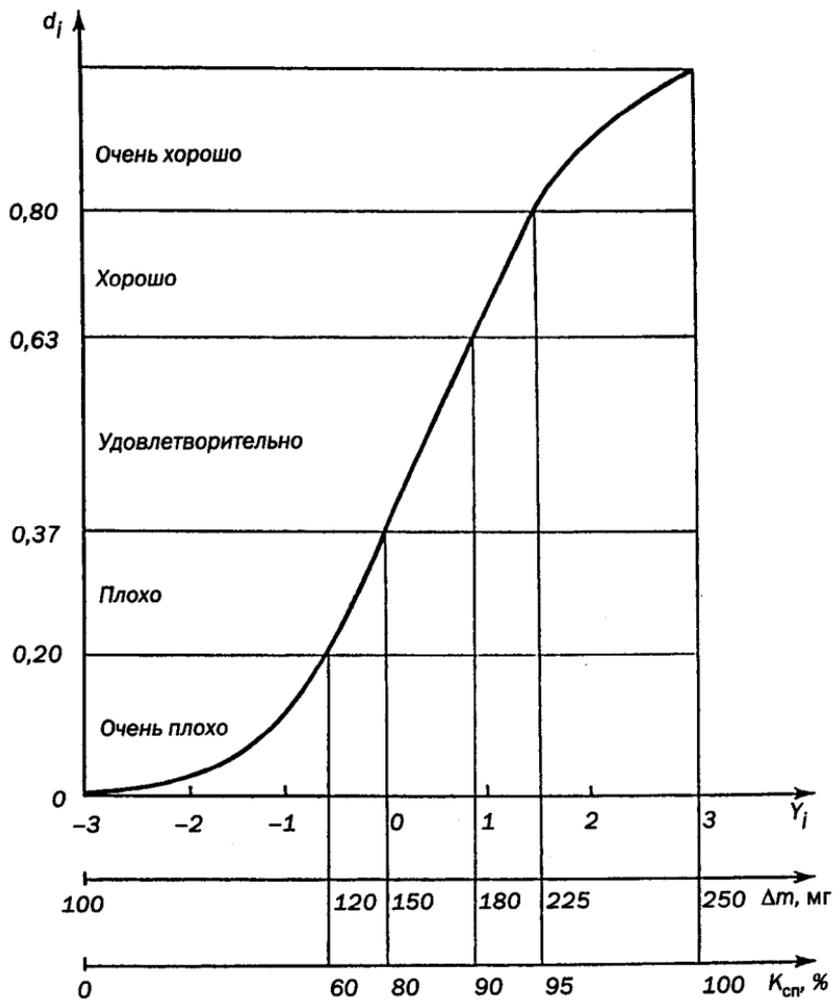


Рис. 6.10. Шкала желательности для поверхности покрытия, полученного электромагнитной наплавкой.

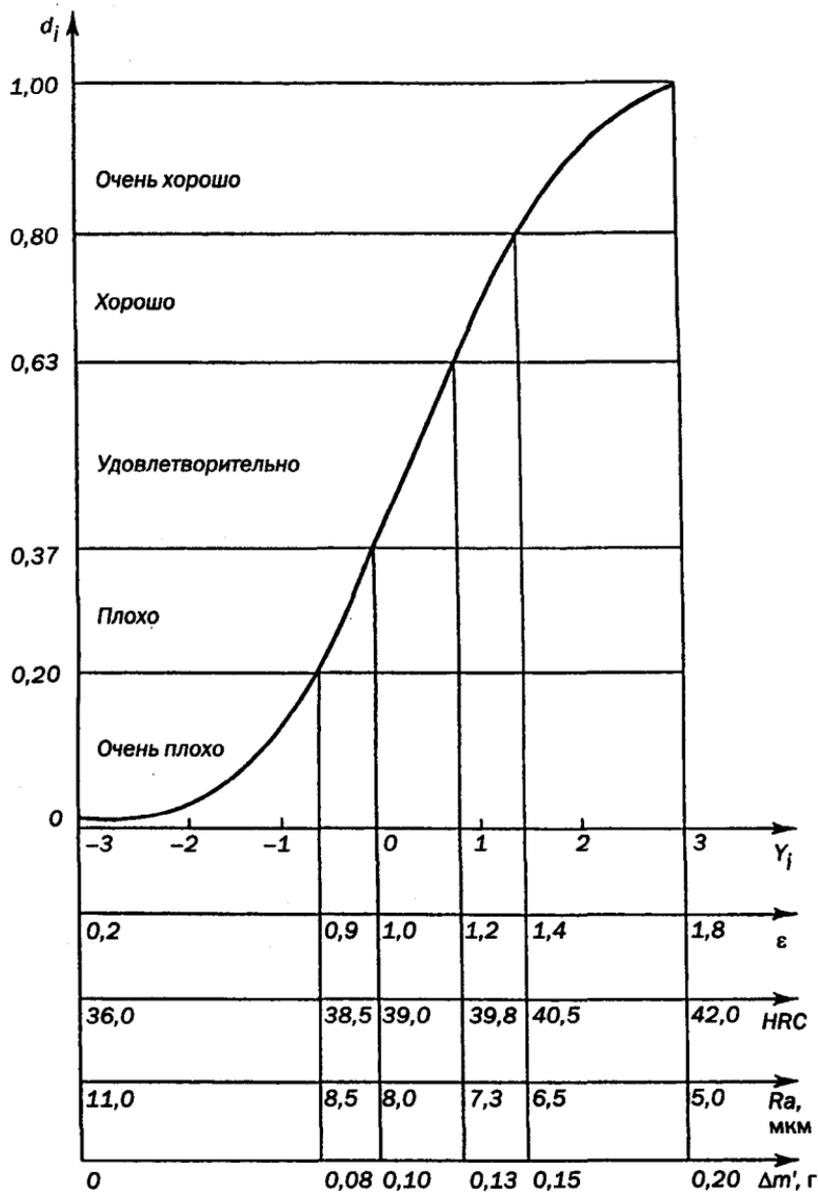


Рис. 6.11. Шкала желательности для поверхности покрытия, полученного ЭМН с ППД.

Значение магнитной индукции B влияет на качество покрытия и в определенной степени на его толщину. При $B < 0,4$ Т порошок слабо удерживается в рабочей зоне, и покрытие из-за плохой сплошности получается некачественным. С повышением магнитной индукции толщина и сплошность покрытия увеличиваются. Но уже при магнитной индукции более 1 Т уменьшаются износостойкость и толщина покрытия, повышается шероховатость поверхности, появляются несплошности (рис. 6.8). Объясняется это тем, что при $B > 1$ Т происходит повышение плотности порошка, что не способствует нормальному формированию цепочек-электродов в рабочей зоне и приводит к нестабильности возникновения электрических разрядов, что не обеспечивает хорошего качества покрытия. Анализ зависимостей (рис. 6.8) показывает, что наиболее благоприятной является магнитная индукция в рабочем зазоре, равная 0,8—1,0 Т.

При выборе подачи и скорости вращения детали следует учитывать, что, чем больше величина подачи и скорости, тем больше производительность процесса. Однако, если изменение подачи в пределах от 0,06 до 0,20 мм/об оказывает незначительное влияние на технологические и эксплуатационные показатели оптимизации, то увеличение подачи более 0,35 мм/об вызывает заметное уменьшение производительности, износостойкости и увеличение шероховатости поверхности (рис. 6.6, б). Обусловлено это сущностью и особенностями процесса ЭМН. Как показано на рис. 6.7, б, с увеличением скорости обработки от 0,06 до 0,08 м/с происходят незначительные изменения параметров, которые практически можно не учитывать. Из данных рис. 6.9 видно, что из всех технологических факторов скорость обработки оказывает наименьшее влияние на износостойкость и твердость покрытия. Она же незначительно влияет на шероховатость поверхности. Из анализа зависимостей, показанных на рис. 6.6, б; 6.7, б; 7.9, следует, что оптимальными являются подача и скорость, при которых удовлетворяются условия $0,2 < S < 0,35$ мм/об и $0,08 < V < 0,09$ м/с.

Таким образом, результаты оптимизации технологических факторов ЭМН (табл. 6.3) показывают, что оптимальные режимы для исследуемых порошков имеют отличия, но незначительные, а по некоторым технологическим факторам практически совпадают. Поэтому для ЭМН различных по химическому составу

порошков можно рекомендовать следующий режим: $i = 2,1 - 2,4 \text{ А/мм}^2$; $V = 0,75 - 1,00 \text{ Т}$; $\delta/\Delta = 8,0 - 8,8$; $g = (2,7 - 3,2) \cdot 10^{-3} \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2)$; $\tau = 0,35 - 0,45 \text{ с/мм}^2$.

Полученные результаты оптимизации технологических факторов ЭМН с ППД (табл. 6.4) показывают, что отличия оптимальных режимов для относительной износостойкости $\varepsilon - Y_1$ от режимов для комплекса параметров, учитывающих $\varepsilon - Y_6$ и не учитывающих $\varepsilon - Y_5$, невелики, особенно для факторов, имеющих высокую степень влияния на износостойкость: I , P и V . Отсюда следует, что для оптимизации технологии ЭМН с ППД по износостойкости, требующей больших затрат на проведение длительных испытаний на машине трения, можно рекомендовать оптимизацию по производительности $\Delta m'$ или параметров качества HRC и Ra , а для экспресс-оценки — измерение твердости HRC коэрцитиметром непосредственно в процессе обработки.

На основании полученных результатов можно рекомендовать следующий режим ЭМН с ППД для получения износостойких покрытий, имеющих наибольшую твердость и наименьшую шероховатость поверхности: $P = 1000 - 1200 \text{ Н}$; $S = 0,22 - 0,35 \text{ мм/об}$; $I = 110 - 125 \text{ А}$; $V = 0,08 - 0,09 \text{ м/с}$; $B = 0,9 - 1,0 \text{ Т}$.

Табл. 6.3.

Оптимальные режимы ЭМН для различных составов порошков.

Порошок	Оптимальные значения факторов				
	$i, \text{ А/мм}^2$	$B, \text{ Т}$	δ/Δ	$g, \text{ г/(с}\cdot\text{мм}^2)$	$\tau, \text{ с/мм}^2$
$Fe-V$	2,38	0,72	8,5	$2,74 \cdot 10^{-3}$	0,385
$Fe-Ti$	2,26	0,78	8,7	$2,80 \cdot 10^{-3}$	0,328
$C-300$	2,07	0,97	8,8	$3,20 \cdot 10^{-3}$	0,468
$P6M5Ф3$	2,09	0,95	7,8	$3,23 \cdot 10^{-3}$	0,428

Табл. 6.4.

Оптимальные режимы процесса ЭМН с ППД.

Параметр оптимизации	Оптимальные значения факторов				
	$P, \text{ Н}$	$S, \text{ мм/об}$	$I, \text{ А}$	$V, \text{ м/с}$	$B, \text{ Т}$
$Y_1 = \varepsilon$	1150	0,27	120	0,084	0,94
$Y_2 = HRC_s$	1160	0,36	126	0,082	1,10
$Y_3 = Ra$	1160	0,22	110	0,090	0,84
$Y_4 = \Delta m'$	1200	0,22	104	0,078	1,10
$Y_5 = (HRC_s, Ra, \Delta m')$	1175	0,32	108	0,082	1,08
$Y_6 = (\varepsilon, HRC_s, Ra, \Delta m')$	1200	0,30	112	0,080	1,08

7. ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ПОКРЫТИЙ*

Физико-механические и эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей машин, в том числе восстановленных, в значительной степени определяют их надежность и долговечность. В связи с этим придается большое значение обеспечению их высокого качества в процессе черновой и чистовой обработок. Актуальны эти вопросы и для деталей, восстановленных ЭМН, которая является одной из промежуточных операций формирования изделий с заданными формой, размерами и комплексом свойств.

Особенности механической обработки покрытий, полученных ЭМН, обусловлены следующими обстоятельствами:

- при обработке поверхности с покрытием возникает более сложное, чем при обработке компактного однородного материала, напряженно-деформированное состояние, связанное с особенностями структуры покрытия, наличием переходной зоны между покрытием и основным материалом, а также возникновением внутренних напряжений вследствие разных коэффициентов термического расширения покрытия и основного материала;
- различные теплофизические свойства материалов покрытия и основы создают более сложную картину распространения тепловых потоков;
- природа физико-химических явлений в зоне контакта инструмента и обрабатываемого покрытия, связанная с особенностями сложного строения материала покрытия и его структуры (наличием пор, трещин, оксидных включений, значительных колебаний твердости, внутренних напряжений, макронеровностей поверхности после наплавки и т. д.), отличается от таковой при обработке компактных однородных материалов;
- строение слоя покрытия обуславливает трудность получения поверхностей высокого качества;
- изнашивание инструмента в процессе обработки вызывает местные разрушения и другие дефекты поверхности покрытия: вырывы, появление царапин, прижоги.

* Глава написана совместно с аспирантом С. Л. Кожуро.

Специфика механической обработки покрытий связана с их структурой. Поэтому при выборе метода и режимов обработки покрытий важно оценить возможное их влияние на свойства материала покрытия и основы, а также на точность.

Известно, что затраты на обработку изделий составляют 36% и более общих затрат на их восстановление и, в отдельных случаях, могут даже превышать затраты на их наплавку и упрочнение (особенно при применении легированных наплавочных материалов).

Технология размерной обработки покрытий, полученных ЭМН, и число выполняемых операций зависят от соотношения допусков на размеры заготовки, детали с покрытием и покрытие $\delta'_{\text{заг}}$, $\delta_{\text{дет}}$ и $\delta_{\text{п}}$. Возможны три случая: $\delta'_{\text{заг}} > \delta_{\text{дет}}$ — при любых значениях $\delta_{\text{п}}$ покрытие подвергают размерной обработке; $\delta'_{\text{заг}} = \delta_{\text{дет}}$ — покрытие также подлежит размерной обработке; $\delta'_{\text{заг}} < \delta_{\text{дет}}$ — при $\delta_{\text{дет}} - \delta'_{\text{заг}} \geq \delta_{\text{п}}$ размерная обработка покрытия исключается, при $\delta_{\text{дет}} - \delta'_{\text{заг}} < \delta_{\text{п}}$ покрытие подвергают размерной обработке. Выбор оптимального соотношения межоперационных припусков при изготовлении деталей с покрытиями, полученными ЭМН, должен сопровождаться технико-экономическим анализом.

7.1. Характеристики обрабатываемости материалов и способы их определения

В настоящее время единой универсальной характеристики обрабатываемости материалов нет. Металл или сплав, обладающий хорошей обрабатываемостью с точки зрения уровня целесообразных скоростей, не может иногда обеспечивать требуемую шероховатость поверхности, при этом возникают слишком большие силы резания и наоборот. Кроме того, необходимо учитывать, что оценка обрабатываемости имеет всегда относительный характер. Например, допускаемая скорость зависит не только от свойств обрабатываемого материала, но и от качества режущего инструмента. Шероховатость обрабатываемой поверхности тесно связана с геометрическими параметрами инструмента и с условиями резания, в частности со скоростью резания, при изменении которых можно получить самые различные результаты.

Обрабатываемость может сильно отличаться для таких разнородных процессов, как точение, фрезерование, шлифование и т. д.

В нормативно-справочной литературе обрабатываемость оценивается в первую очередь интенсивностью затупления режущих инструментов и уровнем целесообразных скоростей резания V . Необходимо, однако, отметить, что скорость резания V как характеристика обрабатываемости имеет ряд недостатков: не известен предел допустимого снижения скоростей резания, применяемого в целях повышения периода стойкости; при сравнении режущих свойств различных инструментальных материалов в зависимости от уровня скорости V не всегда правильно можно оценить их относительную износостойкость; скорость V зависит от принятого критерия затупления. Эту характеристику невозможно использовать для автоматического регулирования процесса резания, так как разным комбинациям V , S , r будут соответствовать резко отличающиеся периоды стойкости.

Обрабатываемость возможно характеризовать рядом показателей (рис. 7.1), однако анализ их показывает, что нельзя говорить об обрабатываемости без конкретного указания на то, какой стороны этого комплексного понятия имеется в виду и каковы особенности производимой операции.

Различные способы оценки обрабатываемости условно можно подразделить на три основные группы (рис. 7.2). К первой группе способов оценки обрабатываемости прежде всего относится "классический". Он заключается в определении зависимостей $V = f(R)$ для различных материалов. Путем измерения износа инструмента через промежутки времени, задавшись определенным периодом стойкости T , можно найти соответствующие ему скорости резания V_{T_1} , V_{T_2} ... и определить коэффициент обрабатываемости: $K_M = V_{T_1} / V_{T_2}$.

Данный способ наиболее точно и объективно отражает влияние обрабатываемого материала на интенсивность изнашивания инструмента, однако он очень трудоемок и требует большого расхода обрабатываемого материала и инструментов.

Во второй группе способов оценки обрабатываемости (рис. 7.2) физическими параметрами процесса резания являются силы резания, уровень температуры в зоне резания (или термоЭДС), шероховатость обработанной поверхности и др.

Перспективным направлением является определение обрабатываемости материала с использованием одновременно способов первой и второй групп.

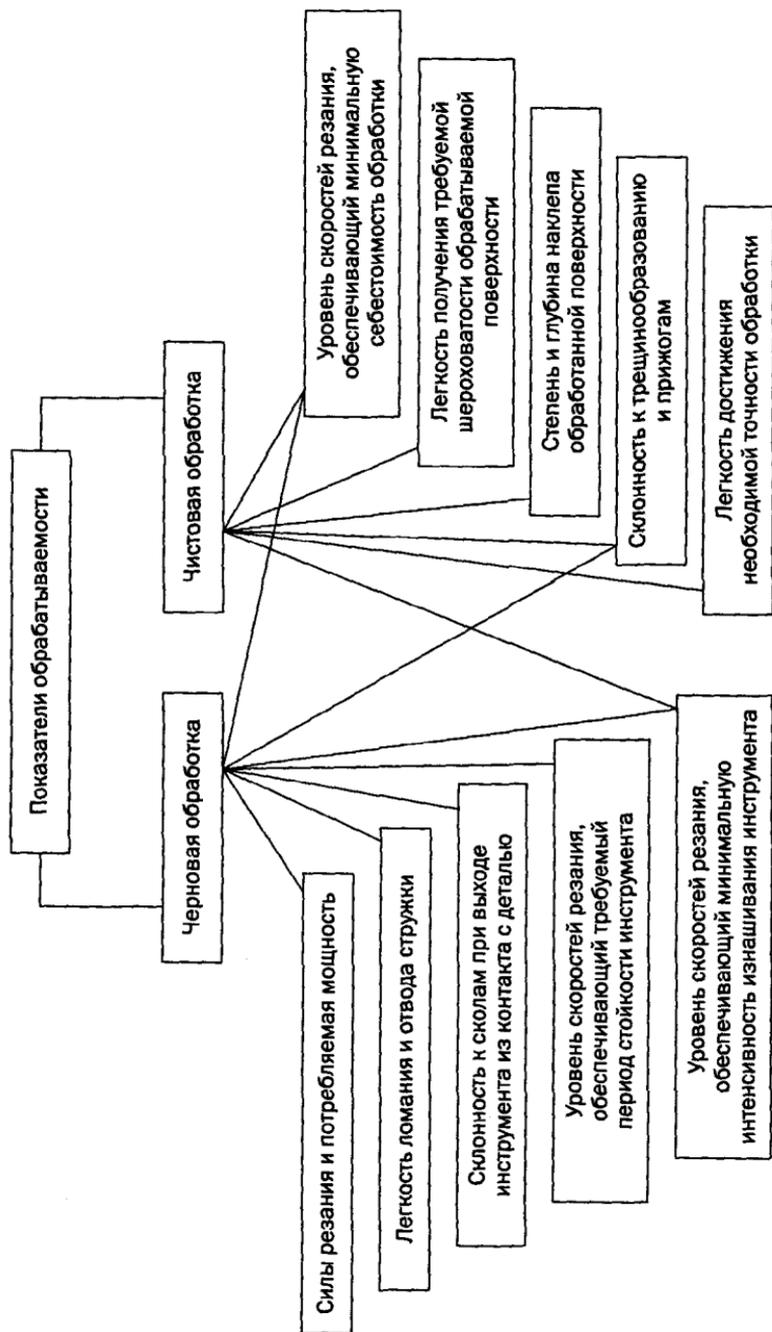


Рис. 7.1. Схема взаимосвязи показателей обрабатываемости.

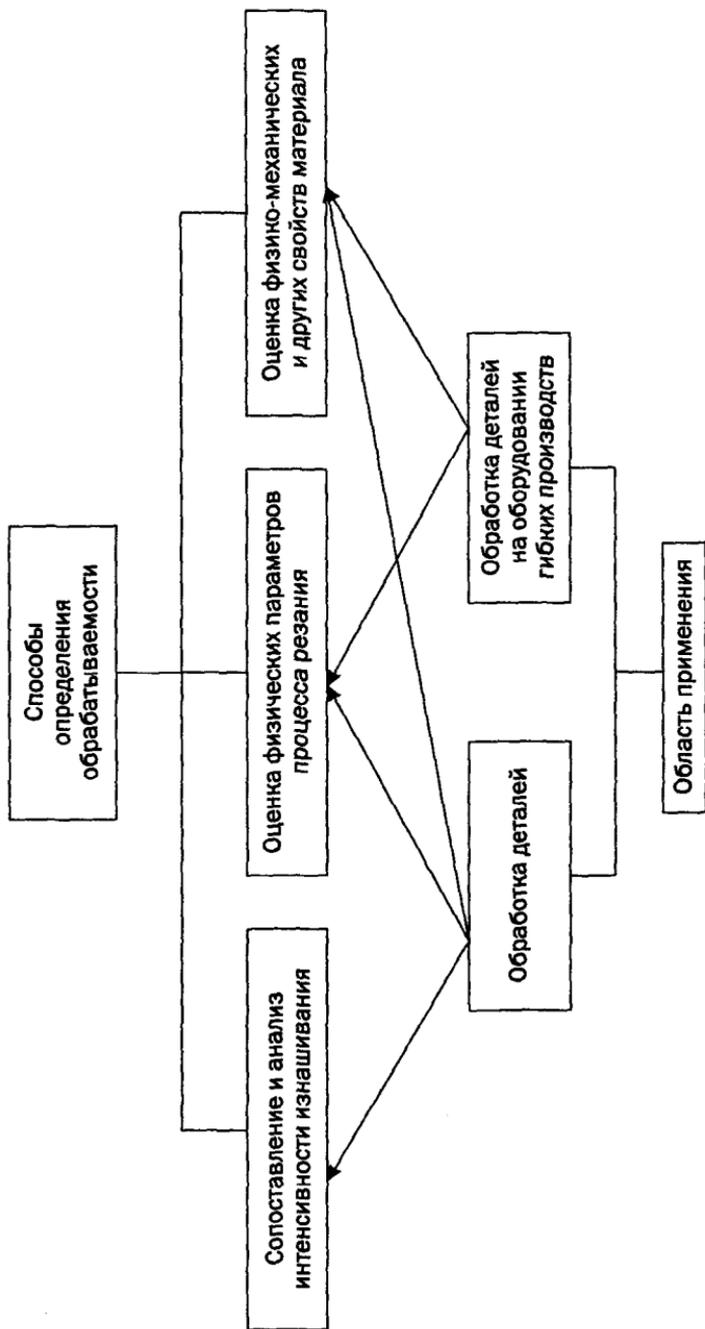


Рис. 7.2. Способы определения обрабатываемости и область их применения.

Первая группа, как отмечалось выше, основана на оценке интенсивности изнашивания при различных скоростях резания. В конечном итоге коэффициент обрабатываемости нового материала $K_m = V/V_3$, где V и V_3 рассматривают соответственно для нового и эталонного материалов.

Единичные показатели обрабатываемости, которые рассматриваются во второй группе способов — силы резания, шероховатость обработанной поверхности, в значительной степени зависят от подачи. Они характеризуют обрабатываемость материала с точки зрения особенностей структурообразования и формирования поверхностного слоя. Объединив две эти группы, можно найти комплексный коэффициент обрабатываемости

$$K_m = (V_T / V_{T_3}) (F_3 / F_i)^{(1-Y_v)/Y_{F_i}},$$

или, учитывая одновременно несколько единичных показателей,

$$K_m = [(V_T / V_{T_3}) (F_{i_1} / F_{i_1})^{(1-Y_{v_1})/Y_{F_{i_1}}} \dots] \cdot \Pi,$$

где V_{T_3} , V_T — скорость резания, обеспечивающая заданную стойкость, соответственно для эталонного и исследуемого материалов; F_{i_1} , F_i — единичный показатель обрабатываемости соответственно эталонного и исследуемого материалов; Y_v , Y_{F_i} — показатель степени, учитывающий соответственно интенсивность влияния подачи на V_T и i -й единичный показатель обрабатываемости.

В третьей группе способов оценки обрабатываемости используются сведения о физических и механических свойствах материалов. Она является перспективным направлением. Общим преимуществом таких способов является существенное снижение трудоемкости и расхода обрабатываемого материала, а в качестве анализируемых параметров используются температуры максимального электросопротивления, пластичности, структурно-фазового превращения α -железа в γ -железо, магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, коэффициент внутреннего трения, сопротивление внедрению инденторов и др.

Рассмотренные выше способы определения обрабатываемости можно эффективно применять в условиях лаборатории. В производственных условиях первая группа способов практически не применима из-за сложности определения интенсивности изнашивания экспериментальным путем и тем более с

помощью расчетов. Вторая и третья группы вполне приемлемы при работе на оборудовании гибких производств.

При оценке показателей обрабатываемости необходимо найти зависимости этого показателя от сочетания различных факторов. Методы планирования эксперимента позволяют получить общее уравнение связи выходного показателя и входных независимых управляемых переменных. Кроме того, использование многофакторных планов дает возможность найти зависимости, характеризующие обрабатываемость сразу по нескольким параметрам. Такая ее оценка в производственных условиях гораздо надежнее.

В качестве критериев обрабатываемости покрытий, полученных ЭМН, в зависимости от метода обработки следует использовать съем материала (производительность), шероховатость поверхности и температуру в зоне обработки.

7.2. Шлифование покрытий абразивными кругами

Определение обрабатываемости поверхностей с покрытиями проводят в три этапа. В качестве критериев обрабатываемости используют съем материала (производительность) Q (г/мин) для черновой и параметр шероховатости поверхности Ra при чистовой обработке.

На первом этапе решалась задача выбора шлифовального круга (инструмента) при обработке покрытий из порошка $Fe-2\%V$ на круглошлифовальном станке модели ЗБ12 после наплавки и наплавки с последующим ППД. Применяли круги из различных видов электрокорунда зернистостью 16—40, карбида кремния зеленого зернистостью 40 на керамической связке и алмазные круги. Получаемые результаты анализировали с целью проверки гипотез о равенстве дисперсий (полей рассеяния) и средних значений (математических ожиданий), так как большинство из известных теоретических и эмпирических зависимостей, полученных для стационарных процессов резания, характеризуется постоянством дисперсий и средних значений внешних воздействий (подачи, глубины, скорости резания и т. д.). Для этого эксперименты по определению производительности повторяли до 5 раз, а параметров шероховатости — до 10—15 раз.

Проверка влияния марки материала круга на параметры обрабатываемости на основании гипотез о равенстве дисперсий и средних значений показала, что она не оказывает влияния на величину генерального среднего U . По-

этому при обработке образцов с ЭМН и ЭМН с ППД можно использовать любой из предложенных кругов.

В качестве примера рассмотрим обработку образцов при следующем режиме: окружная скорость круга $V_k = 30$ м/с; окружная скорость образца $V = 36,3$ м/мин; продольная подача $S_{пр} = 2,25$ м/мин; поперечная подача $S_n = 0,01$ мм/дв.ход; число двойных ходов выхаживания $n = 5$; СОЖ — 5-процентной раствор эмульсола Э2 в воде.

Полученные результаты приведены на рис. 7.3. Из них легко увидеть, что сьем кругами из электрокорунда белого и легированного одинаково эффективен независимо от зернистости и твердости и обусловлен, очевидно, в первую очередь, влиянием связки, поскольку использование вулканитовой связки снижает сьем примерно вдвое. Наихудшие результаты по съему имеет круг из карбида кремния зеленого. Это явление отличается от известных представлений о работоспособности таких кругов, однако может быть объяснено, если учесть, что в диапазоне температур 750—850°C твердость зерен электрокорунда несколько выше твердости зерен карбида кремния. Вероятно, именно эти температуры имеют место в зоне контакта круга 64С40ПМ37К5 с покрытием.

С учетом одновременной оценки величин Q и Ra можно в случае применения однократного шлифования рекомендовать круг 25А25ПСМ27К6, который обеспечил высокие результаты по шероховатости ($Ra = 0,65—0,75$ мкм), что соответствует чистовому шлифованию.

Наилучшие результаты по величине съема были получены при использовании круга 91А16ПСМ29К5 для деталей с покрытиями, полученными ЭМН, но, поскольку $Ra = 1,2—1,5$ мкм, его нельзя рекомендовать для однократного шлифования. Надо отметить, что круги таких марок значительно засаливаются и требуют частых правок.

При использовании круга 13А20НС27В5 были зафиксированы низкие результаты по величине съема и шероховатости поверхности; на обработанной поверхности детали наблюдались прижоги.

Алмазный круг АС125/100С2100Б1 выявил высокие результаты по исследуемым параметрам как при обработке покрытий с ППД, так и без него, но большая часть поверхности обработанных образцов содержала прижоги. Последнее обстоятельство легко объяснить взаимодействием

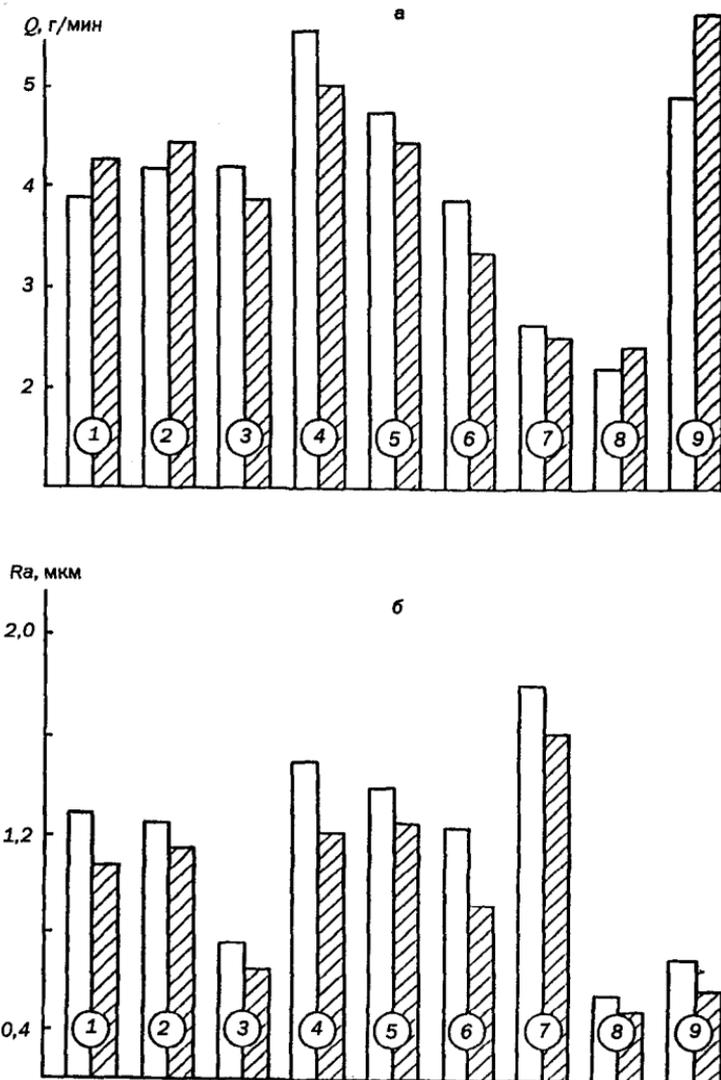


Рис. 7.3. Производительность Q (а) и шероховатость поверхности Ra (б) при шлифовании покрытий, полученных ЭМН (незастриховано) и ЭМН с ППД (застриховано), кругами: 1 — 24А25НСМ17К5; 2 — 25А40НС25К6; 3 — 25А25ПСМ27К6; 4 — 91А16ПСМ29К5; 5 — 25А40ПС25К6; 6 — 15А0НС27К6; 7 — 13А200НС27В5; 8 — 64С40ПМ37К5; 9 — АСР125/100С2100Б1.

алмазов с железом обрабатываемого покрытия, что вызывает интенсивное затупление зерен и возрастание температуры шлифования.

В случае применения двухкратного шлифования (чернового и чистового) можно для предварительного шлифования рекомендовать круги 24A25НСМ17К5, 15A40НС27К6, 25A40ПС25К6, которые показали хорошие результаты по производительности процесса шлифования и по параметрам шероховатости. Для чистового шлифования можно использовать круг 64С40ПМ37К5, обеспечивающий $Ra = 0,45—0,55$ мкм.

Обрабатываемость покрытий, полученных ЭМН с ППД, при черновой обработке незначительно лучше, чем при чистовой (рис. 7.3), что связано с уплотнением поверхностного слоя и повышением его твердости. Однако существенных отличий как в целом, так и по области использования кругов в отдельности не наблюдается.

На втором этапе определения обрабатываемости покрытий, полученных ЭМН и ЭМН с ППД, рассматривалось влияние режимов шлифования на производительность и качество обработанной поверхности.

Известно, что съем материала и параметры шероховатости обработанной поверхности при шлифовании подчиняются логарифмическому нормальному закону распределения. Поэтому зависимость исследуемых параметров от изучаемых факторов можно представить зависимостью

$$P = e^{\alpha} \cdot S_{np}^x \cdot S_n^y \cdot V^z \cdot n^{\beta}, \quad (7.1)$$

где P — исследуемый параметр; $e = 2,718$ — основание натурального логарифма; α, x, y, z, β — коэффициенты регрессии; S_{np}, S_n, V, n — независимые переменные (факторы).

Уравнение (7.1) является исследуемой математической моделью, в которой для получения значений показателей степени делаем преобразование, прологарифмировав обе части. В результате получаем уравнение

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4.$$

Здесь Y истинное значение параметра в логарифмическом масштабе; X_1, X_2, X_3, X_4 — логарифмы регрессии, соответственно S_{np}, S_n, V, n ; b_1, b_2, b_3, b_4 — коэффициенты, значения которых определяем при помощи метода математического планирования экспериментов, применив дробный факторный эксперимент типа 2^{4-1} .

В нашем случае функциями отклика служили следующие параметры: $Y_1=Q$ — съем материала, г/мин; $Y_2=Ra$ — среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; $Y_3=H_{max}$ — отклонение 5 наибольших максимумов, мкм; $Y_4=H_{min}$ — отклонение 5 наибольших минимумов, мкм; $t_p=V_5$ — относительная опорная длина профиля на уровне p , %.

Условия экспериментов, матрицы планирования и полученные результаты представлены в табл. 7.1—7.3.

Табл. 7.1.

Условия экспериментов при обработке покрытий, полученных ЭМН и ЭМН с ППД.

Уровень факторов	Фактор							
	S_{np} , м/мин		S_n , мм/дв.ход		V , м/мин		n , раз	
	X_1	$\ln S_{np}$	X_2	$\ln S_n$	X_3	$\ln V$	X_4	$\ln n$
Верхний (+1)	4,0	1,386	0,02	-3,912	40	3,689	4	1,386
Нижний (-1)	2,0	0,693	0,01	-4,605	20	2,996	2	0,603

Обработку образцов с покрытием из порошка $Fe-2\%V$ производим шлифовальным кругом 15A40PC27K6 с охлаждением 5-процентным раствором эмульсола в воде при скорости $V_k = 30$ м/с.

Расчет коэффициентов уравнений регрессии функций отклика и их статистический анализ проводили по программе на ЭВМ.

Установлено, что во всех уравнениях коэффициенты по критерию Стьюдента значимы с 95-процентной доверительной вероятностью, а уравнения по критерию Фишера адекватны при 5-процентном уровне значимости.

Уравнения регрессии, полученные по матрице табл. 7.2, имеют вид

$$\begin{aligned}
 Q &= 1,521 + 0,792X_1 + 0,436X_2 - 0,052X_3 + 0,249X_4; \\
 Ra &= 0,059 + 0,411X_1 + 0,093X_2 - 0,109X_3 + 0,023X_4^*; \\
 H_{max} &= 1,416 + 0,284X_1 + 0,070X_2 + 0,025X_3^* - 0,033X_4; \\
 H_{min} &= 1,666 + 0,283X_1 + 0,012X_2^* + 0,089X_3 - 0,015X_4^*; \\
 t_p &= 4,022 - 0,055X_1 + 0,006X_2^* + 0,050X_3 + 0,059X_4.
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

Уравнения регрессии, полученные по матрице табл. 7.3, имеют вид

$$\begin{aligned}
 Q' &= 1,754 + 0,706X_1 + 0,332X_2 + 0,087X_3 + 0,006X_4^*; \\
 Ra' &= -0,072 + 0,332X_1 + 0,141X_2 - 0,099X_3 - 0,061X_4; \\
 H'_{max} &= 1,381 + 0,198X_1 + 0,170X_2 - 0,042X_3^* - 0,063X_4; \\
 H'_{min} &= 1,607 + 0,103X_1 + 0,063X_2 - 0,052X_3 - 0,050X_4; \\
 t'_p &= 3,853 - 0,082X_1 - 0,074X_2 - 0,024X_3^* - 0,005X_4^*.
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

Табл. 7.2.
Матрица планирования и результаты экспериментов (обработка покрытий, полученных ЭМН).

Номер опыта	Уровень факторов				Параметр				
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃ X ₄	Y ₁ /ln Y ₁	Y ₂ /ln Y ₂	Y ₃ /ln Y ₃	Y ₄ /ln Y ₄	Y ₅ /ln Y ₅
1.	+	-	-	-	1,163/0,151	0,68/-0,371	2,75/1,01	3,23/1,17	45,1/3,81
2.	+	+	-	+	7,400/2,001	1,87/0,626	6,10/1,81	7,27/1,98	50,4/3,93
3.	+	-	+	+	4,250/1,447	0,082/-0,198	2,45/0,90	3,06/1,12	63,3/4,15
4.	+	+	+	-	14,478/2,691	1,86/0,621	6,36/1,85	7,64/2,03	55,3/4,01
5.	+	-	-	+	1,875/0,629	0,57/-0,562	3,08/1,12	4,91/1,59	75,9/4,33
6.	+	+	-	+	4,750/1,558	1,19/0,174	4,22/1,44	6,48/1,87	55,0/4,01
7.	+	-	+	+	1,990/0,688	0,76/-0,274	4,47/1,50	5,22/1,65	56,0/4,03
8.	+	+	+	+	20,150/3,003	1,59/0,464	5,48/1,70	6,75/1,91	50,8/3,93

Табл. 7.3.
Матрица планирования и результаты экспериментов (обработка покрытий, полученных ЭМН с ППД).

Номер опыта	Уровень факторов				Параметр				
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃ X ₄	Y ₁ /ln Y ₁	Y ₂ /ln Y ₂	Y ₃ /ln Y ₃	Y ₄ /ln Y ₄	Y ₅ /ln Y ₅
1.	+	-	-	-	1,556/0,44	0,62/-0,047	3,29/1,19	4,26/1,45	54,3/3,81
2.	+	+	-	+	7,525/2,02	1,25/0,22	4,34/1,47	5,08/1,63	46,9/3,85
3.	+	-	+	+	4,850/1,58	0,86/-0,15	3,75/1,32	4,86/1,58	49,4/3,90
4.	+	+	+	-	13,85/2,63	1,67/0,51	5,53/1,71	7,28/1,99	51,8/3,95
5.	+	-	-	+	2,095/1,74	0,47/-0,76	2,15/0,77	4,39/1,48	66,7/4,20
6.	+	+	-	+	12,050/2,49	1,17/0,16	4,14/1,42	5,09/1,63	46,8/3,85
7.	+	-	+	+	4,189/1,43	0,79/-0,24	4,28/1,45	4,53/1,51	45,8/3,82
8.	+	+	+	+	14,910/2,70	1,16/0,15	5,57/1,72	4,98/1,61	31,3/3,44

Уравнения регрессии (7.2) и (7.3) преобразованы и после потенцирования приняли следующий вид:

- для покрытий, полученных ЭМН,

$$\begin{aligned}
 Q &= e^{2.663} \cdot S_{np}^{2.286} \cdot S_n^{0.725} \cdot V^{-0.149} \cdot n^{0.359}; \\
 Ra &= e^{0.557} \cdot S_{np}^{1.187} \cdot S_n^{0.155} \cdot V^{-0.316} \cdot n^{0.032}; \\
 H_{max} &= e^{0.886} \cdot S_{np}^{0.818} \cdot S_n^{0.116} \cdot V^{0.071} \cdot n^{-0.048}; \\
 H_{min} &= e^{0.065} \cdot S_{np}^{0.815} \cdot S_n^{0.02} \cdot V^{0.258} \cdot n^{-0.022}; \\
 t_p &= e^{3.692} \cdot S_{np}^{-0.16} \cdot S_n^{0.01} \cdot V^{0.14} \cdot n^{0.085},
 \end{aligned} \tag{7.4}$$

- а для покрытий, полученных ЭМН с ППД,

$$\begin{aligned}
 Q' &= e^{1.279} \cdot S_{np}^{2.036} \cdot S_n^{0.551} \cdot V^{0.251} \cdot n^{0.008}; \\
 R'/a &= e^{1.003} \cdot S_{np}^{0.959} \cdot S_n^{0.234} \cdot V^{-0.286} \cdot n^{-0.088}; \\
 H'_{max} &= e^{2.525} \cdot S_{np}^{0.571} \cdot S_n^{0.282} \cdot V^{-0.12} \cdot n^{-0.091}; \\
 H'_{min} &= e^{2.306} \cdot S_{np}^{0.298} \cdot S_n^{0.105} \cdot V^{-0.15} \cdot n^{-0.05}; \\
 t'_{50} &= e^{3.782} \cdot S_{np}^{-0.123} \cdot S_n^{-0.123} \cdot V^{-0.07} \cdot n^{-0.007}.
 \end{aligned} \tag{7.5}$$

Уравнения (7.4) и (7.5) позволяют построить графики (рис. 7.4—7.7), показывающие влияние продольной подачи S_{np} , поперечной подачи S_n , окружной скорости детали V и числа проходов выжигивания n на производительность шлифования Q и параметры шероховатости обработанной поверхности Ra , H_{max} , H_{min} и t_p при обработке покрытий, полученных ЭМН и ЭМН с ППД.

В качестве средних величин для варьирующих факторов при подставлении в уравнения (7.4) и (7.5) используем величины: $S_{np} = 2,25$ мм/дв.ход; $S_n = 0,013$ мм/дв.ход; $V = 30$ м/мин; $n = 2$.

Как видно из рис. 7.4—7.7, закономерность изменения исследуемых параметров в зависимости от технологических факторов при обработке покрытий, полученных как ЭМН, так и ЭМН с ППД, одинакова. Зависимости $Q = f(S_{np}, S_n, V, n)$; $Ra = f(S_{np}, S_n, V, n)$ почти линейны. Различия только в значениях крутизны, т. е. в значениях, характеризующих степень влияния величины

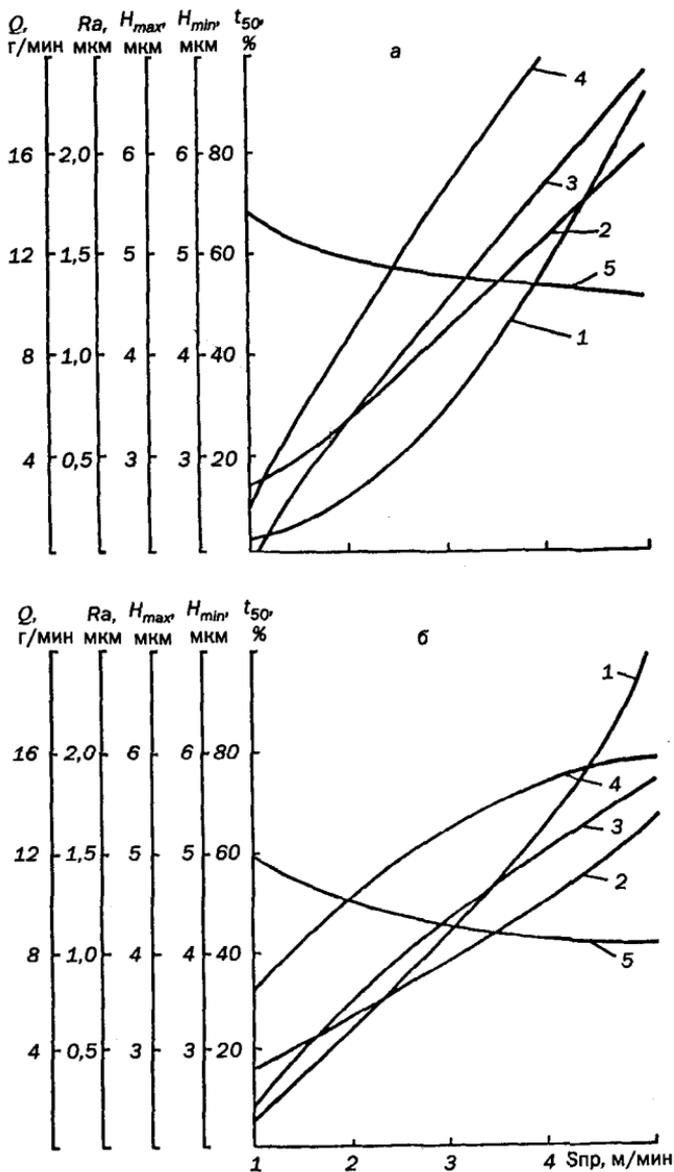


Рис. 7.4. Влияние продольной подачи $S_{пр}$ на производительность шлифования Q (1) и параметры шероховатости обработанной поверхности Ra (2), H_{max} (3), H_{min} (4), t_{50} (5) покрытий, полученных ЭМН (а) и ЭМН с ППД (б).

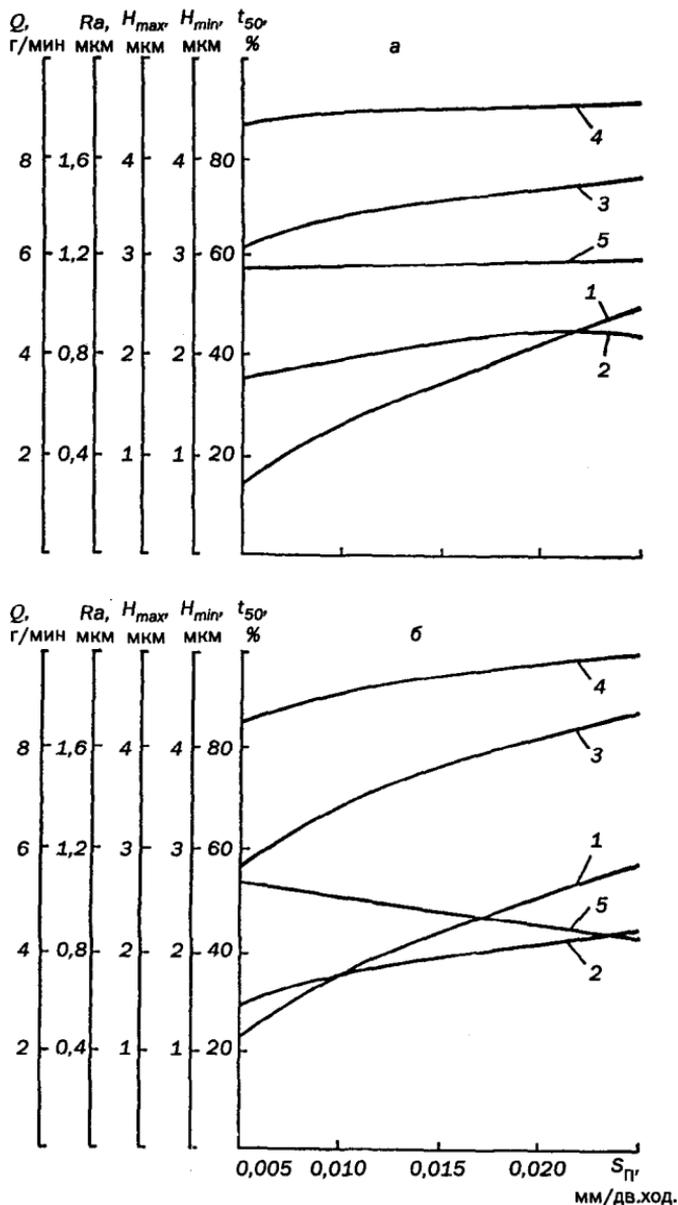


Рис. 7.5. Влияние поперечной подачи $S_{\text{П}}$ на производительность шлифования Q (1) и параметры шероховатости обработанной поверхности Ra (2), H_{max} (3), H_{min} (4), t_{50} (5) покрытий, полученных ЭМН (а) и ЭМН с ППД (б).

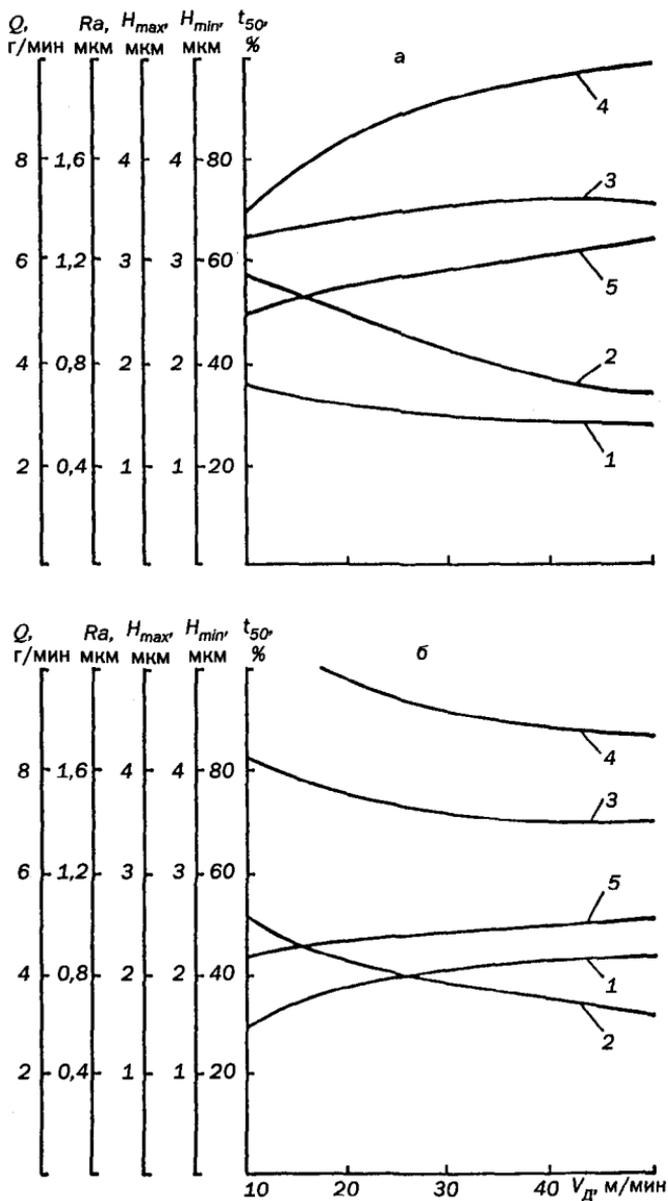


Рис. 7.6. Влияние окружной скорости заготовки V_d на производительность шлифования Q (1) и параметры шероховатости обработанной поверхности Ra (2), H_{max} (3), H_{min} (4), t_{50} (5) покрытий, полученных ЭМН (а) и ЭМН с ППД (б).

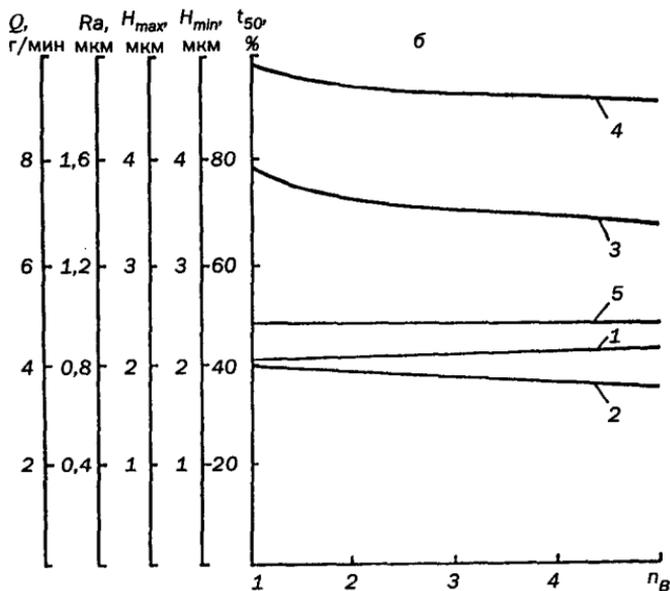
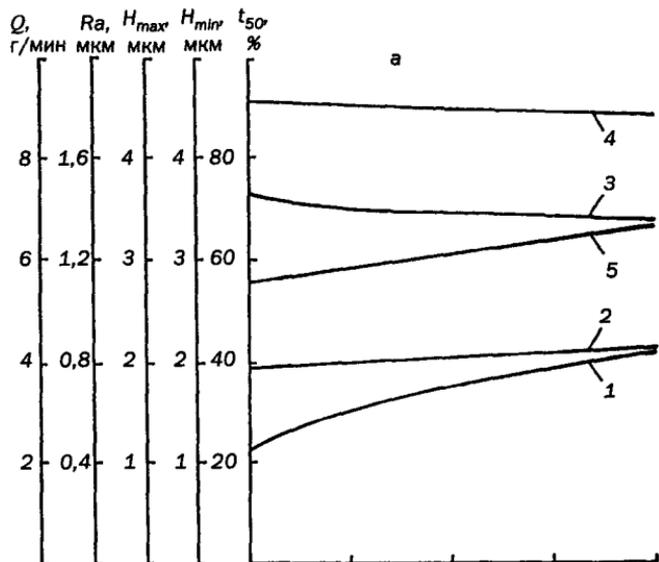


Рис. 7.7. Влияние числа проходов выходаживания n_B на производительность шлифования Q (1) и параметры шероховатости обработанной поверхности Ra (2), H_{max} (3), H_{min} (4), t_{50} (5) покрытий, полученных ЭМН (а) и ЭМН с ППД (б).

того или другого фактора на параметры процесса. Так при увеличении продольной (рис. 7.4) и поперечной (рис. 7.5) подач производительность резко увеличивается, а качество обработанной поверхности ухудшается. В тоже время при увеличении скорости заготовки (рис. 7.6) и числа проходов выхаживания (рис. 7.7) производительность изменяется незначительно, а параметры качества улучшаются. Из всех исследуемых факторов наибольшее влияние на производительность шлифования и качество обработанной поверхности оказывает продольная подача, наименьшее — число проходов выхаживания.

Анализ полученных уравнений (7.4) и (7.5) и зависимостей, представленных на рис. 7.4—7.7, позволяет рекомендовать для обработки покрытий, полученных ЭМН, следующий режим: $V_k = 30$ м/с; $V = 40$ м/мин; $S_{пр} = 1—3$ м/мин; $S_n = 0,005—0,010$ мм/дв.ход; $n = 3—4$. Для обработки поверхностей деталей, подвергнутых ЭМН с ППД, продольную подачу следует увеличить до $2—3$ м/мин, а поперечную — до $0,01—0,015$ мм/дв.ход.

На третьем этапе определяем обрабатываемость покрытий, полученных ЭМН и ЭМН с ППД порошков из различных материалов по критериям Q , Ra и r_p .

Обработку образцов (по 10 штук для каждого порошка) проводим шлифовальным кругом 15A40HC27K6 с применением СОЖ (5-процентной водный раствор эмульсола Э2) при следующем режиме: $V_k = 30$ м/с; $V_d = 36$ м/мин; $S_{пр} = 1,7$ м/мин; $S_n = 0,01$ мм/дв.ход; $n = 3$.

Полученные результаты представлены на рис. 7.8, из которого следует, что метод нанесения покрытий не оказывает существенного влияния на обрабатываемость последних. В тоже время химический состав материалов порошков влияет на обрабатываемость покрытий. С учетом убывания обрабатываемости рассматриваемые покрытия (рис. 7.8) по критериям обрабатываемости можно расположить в ряды. Так, для покрытий, полученных ЭМН, имеем:

- по критерию Q :

ПР—Сталь45—1%В→Fe—2%V→ПЖРВ2→Fe—10%V→
Fe—Ti→Р6М5Ф3→С-300→Р6М5К5→ФБ-3;

- по критерию Ra :

ФБ-3→Р6М5К5→Р6М5Ф3→С-300→Fe—Ti→Fe—10%V→Fe—2%V→
ПР Сталь 45—1%В→ПЖРВ2;

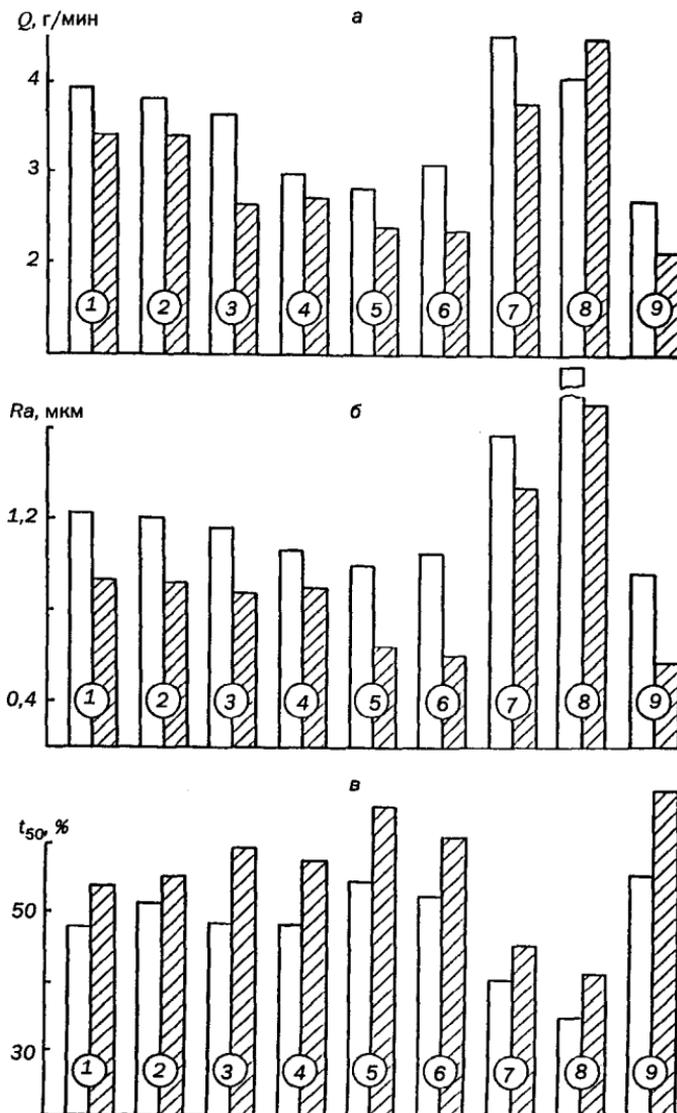


Рис. 7.8. Производительность Q (а) и параметры шероховатости обработанной поверхности Ra (б) и t_{50} (в) при шлифовании покрытий, полученных ЭМН (незаитриховано) и ЭМН с ППД (заитриховано) порошков: 1) Fe-2%V; 2) Fe-10%V; 3) Fe-Ti; 4) С-300; 5) Р6М5К5; 6) Р6М5Ф3; 7) ПР, Сталь 45-1%B; 8) ПЖРВ2; 9) ФБ-3

- по критерию t_p :
 $\text{ФБ-3} \rightarrow \text{Р6М5К5} \rightarrow \text{Р6М5Ф3} \rightarrow \text{Fe-10\%V} \rightarrow \text{Fe-Ti} \rightarrow \text{Fe-2\%V} \rightarrow \text{C-300} \rightarrow$
 $\text{ПР Сталь 45-1\%В} \rightarrow \text{ПЖРВ2.}$
 Для покрытий, полученных ЭМН с ППД:
- по критерию Q :
 $\text{ПЖРВ2} \rightarrow \text{ПР Сталь 45-1\%В} \rightarrow \text{Fe-2\%V} \rightarrow \text{Fe-10\%V} \rightarrow \text{C-300} \rightarrow \text{Fe-Ti} \rightarrow$
 $\text{Р6М5К5} \rightarrow \text{Р6М5Ф3} \rightarrow \text{ФБ-3};$
- по критерию Ra :
 $\text{ФБ-3} \rightarrow \text{Р6М5Ф3} \rightarrow \text{Р6М5К5} \rightarrow \text{Fe-Ri} \rightarrow \text{C-300} \rightarrow \text{Fe-10\%V} \rightarrow \text{Fe-2\%V} \rightarrow$
 $\text{ПР Сталь 45-1\%В} \rightarrow \text{ПЖРВ2};$
- по критерию t_p :
 $\text{ФБ-3} \rightarrow \text{Р6М5К5} \rightarrow \text{Р6М5Ф3} \rightarrow \text{Fe-Ti} \rightarrow \text{C-300} \rightarrow \text{Fe-10\%V} \rightarrow \text{Fe-2\%V} \rightarrow$
 $\text{ПР Сталь 45-1\%В} \rightarrow \text{ПЖРВ2.}$

Покрытия, с учетом влияния химического состава материалов порошков на обрабатываемость, разделим на две группы. К первой группе отнесем покрытия, которые при обработке показали самые высокие результаты по критерию производительности и очень низкие по критериям качества обработанной поверхности (ПР Сталь 45-1%В и ПЖРВ2). Вторую группу составят покрытия, имеющие наилучшие показатели по критериям качества обработанной поверхности и низкие по производительности (ФБ-3, Р6М5К5, Р6М5Ф3, С-300, Fe-V, Fe-Ti).

Видно (рис. 7.8), что покрытия, имеющие лучшую обрабатываемость по производительности, показывают наихудшие результаты по критериям качества обработанной поверхности. Обусловлено это тем, что химический состав материалов порошков при формировании покрытий определяет физико-механические свойства последних, которые оказывают влияние на обрабатываемость. Так, покрытия второй группы относятся к высоколегированным, имеющим высокую микротвердость. Например, в покрытиях из порошков Fe-V и Fe-Ti присутствуют твердые растворы ванадия и титана в железе. В структуре покрытий из быстрорежущих сталей, ферробора и высокохромистого чугуна эвтектического состава, наряду с твердыми растворами, присутствуют карбиды вольфрама, ванадия, молибдена, бора и других металлов, входящих в состав исследуемых порошков. Кроме того, пористость и магнитные свойства покрытий второй группы значительно ниже, чем первой. Все это

обуславливает лучшую обрабатываемость покрытий второй группы по критериям качества обработанной поверхности. Наилучшую обрабатываемость по этим критериям показали покрытия из порошков ФБ-3, Р6М5Ф3, Р6М5К5, имеющие наибольшую микротвердость.

Таким образом, из широкой номенклатуры покрытий наилучшие результаты как по производительности, так и по качеству обработанной поверхности показали материалы на основе феррованадия и ферротитана. Наилучшие показатели по качеству обработанной поверхности дали материалы из быстрорежущих сталей и ферробора. Для обработки покрытий шлифованием наиболее универсальны среднемягкие круги из электрокорундов белого и нормального зернистостью 25—40 мкм на керамической связке. Их можно использовать как при черновой, так и при чистовой обработке. При этом окружную скорость круга целесообразно принимать 30—35 м/с, окружную скорость обработанной детали до 40 м/мин, продольную подачу 1—2 м/мин, поперечную – 0,005—0,01 мм/дв.ход, число проходов выхаживания 2—3. Использование других видов материалов и связок нецелесообразно в связи с низкой производительностью обработки или из-за засаливания и возникновения прижогов. Приоритетное применение керамической связки обусловлено ее высокой теплостойкостью (по сравнению с вулканитовой и бакелитовой связками). Использование легированного электрокорунда и синтетических алмазов нежелательно из-за химической активности с обрабатываемыми материалами покрытий, полученных на основе железа.

7.3. Шлифование поверхностей с покрытиями кругом на пористой металлической связке с ориентированными алмазными зёрнами

Применение шлифования на финишных операциях обусловлено тем, что процесс имеет ряд преимуществ перед другими видами обработки. Однако и шлифование имеет недостатки, к которым следует отнести не полное использование режущих свойств отдельных абразивных зёрен, что обусловлено хаотическим расположением их в объеме шлифовального круга. По этой же причине снижается интенсивность съема металла, часто возникают так

называемые штриховые поверхности, образуются структурные концентраторы напряжений и даже микротрещины.

Поскольку основным фактором, влияющим на работоспособность алмазных шлифовальных кругов, являются высокая температура в зоне резания, представляют большой интерес обрабатываемость поверхностей с электромагнитными покрытиями на финишной операции алмазным кругом, при которой имеется возможность снизить температуру за счет подачи СОЖ через поры круга и обеспечить наилучшие условия обработки за счет ориентации зерен относительно плоскости резания.

Для примера рассмотрим использование шлифовального круга на пористой металлической связке с ориентированными алмазными зернами (рис. 7.9), у которого ступица 1 со сквозными каналами 2 служит для крепления инструмента на шпинделе станка и обеспечивает подвод СОЖ к алмазному слою 3, состоящему из связки и алмазных зерен 4, ориентированных относительно плоскости резания. В качестве пористой металлической связки (МП1) брали бронзовый порошок с частицами сферической формы марки Бр.ОФ 10—1 (медь — 85%, олово — 12—15%), обладающий высокой теплопроводностью, низким коэффициентом трения, хорошими физико-механическими свойствами и износостойкостью. Пористость составляла 30%, средний диаметр пор 0,04 мм, зернистость алмазных зерен марки АСВ 125/100, концентрация алмазов 100%, размер фракции порошка связки 63—100 мкм. Алмазные зерна металлизировались никелем толщиной 5 мкм.

Особое значение для алмазного инструмента с ориентированными зернами приобретают геометрические параметры зерен, такие как форма зерна, радиус округления вершины r , угол заострения вершины β и их взаимосвязь.

Известно, что для марок алмазного порошка АСВ, АСК и зернистости 25/12 средние значения радиусов вершин зерен находятся в пределах 6—9 мкм, средние значения угла заострения вершины — 60—80°. Наибольший сьем металла производят зерна, расположенные к плоскости резания с передним углом γ от -5 до -20° . Величину заднего угла α для алмазных зерен следует принимать 8—10°. Угол ориентации алмазных зерен θ определяется из соотношения $\theta = 90^\circ - \beta/2 - \alpha$. При этом $\gamma = 90^\circ - \alpha - \beta$. Тогда, рассматривая совместно зависимости, получим $\theta = (90^\circ - \gamma - \alpha)/2$.

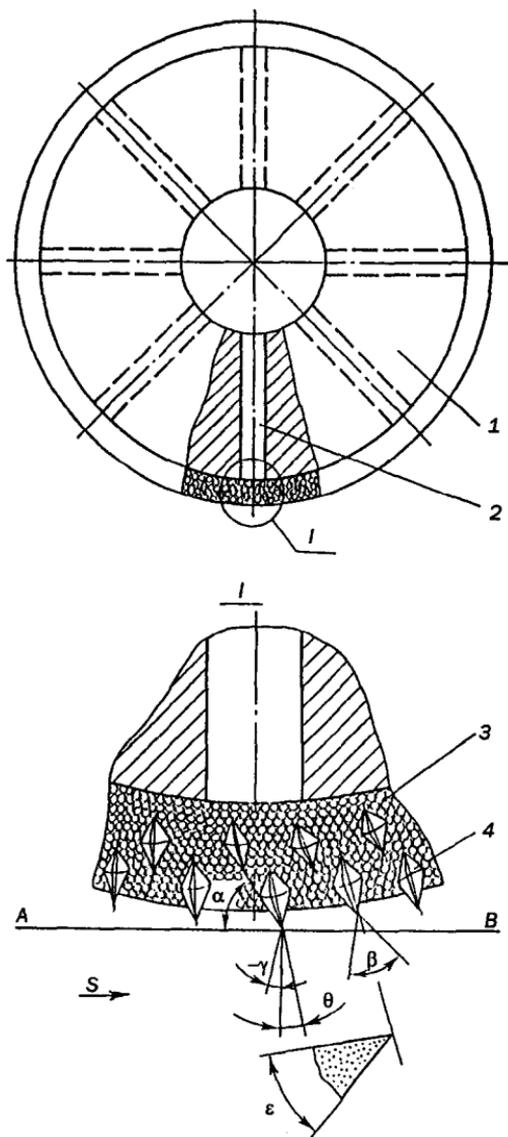


Рис. 7.9. Схема шлифовального круга на пористой связке с ориентированными алмазными зёрнами.

Инструмент с ориентированными зернами алмаза по сравнению с алмазным инструментом с неориентированными зернами позволяет увеличить число активных зерен, участвующих в процессе формообразования поверхности, от 10—17% теоретического количества режущих зерен, расположенных на 1см^2 поверхности инструмента, до 45—60%, что обеспечивает увеличение режущей способности инструмента.

Оценку обрабатываемости электромагнитных покрытий в зависимости от конструкции круга, способа охлаждения и режима шлифования производили по второй группе способов, взяв за показатель обрабатываемости температуру в зоне резания. Контактная температура, измеряемая экспериментально, является наиболее достоверным критерием оценки работы шлифовального круга по тепловому параметру. Температуру в зоне шлифования определяли с помощью искусственной термпары.

Обработку проводили при плоском шлифовании периферией круга образцов ($20 \times 20 \times 15$) с покрытиями из порошка $Fe-2\%V$ кругами: 15A40PC27K6, алмазным АСВ 125/100 М58/100 и алмазным АСВ 125/100 МП1/100 на пористой металлической связке с ориентированными алмазными зернами на станке модели ЗБ64. Образцы шлифовали без охлаждения, при обычном способе подачи СОЖ поливом и через поры круга в зону резания. В качестве СОЖ применяли 3-процентный водный раствор кальцинированной соды.

Известно, что распределение контактной температуры при шлифовании подчиняется логарифмическому нормальному закону распределения. Поэтому зависимость ее от режима шлифования для различных конструкций кругов и способов охлаждения можно представить по аналогии с (7.1) уравнением

$$T = e^{\alpha} \cdot V^x \cdot S^y \cdot t^z, \quad (7.6)$$

где T — контактная температура, $^{\circ}\text{C}$; V — скорость резания, м/с; S — подача, м/мин; t — глубина резания, мм.

Уравнение (7.6) является математической моделью, для которой значения неизвестных определяли при помощи метода математического планирования экспериментов, применив ПФЭ типа 2^3 .

Функциями отклика служили следующие параметры: $V_1 = T_1$ контактная температура при шлифовании абразивным кругом без охлаждения; $V_2 = T_2$ —

при шлифовании абразивным кругом с охлаждением свободным поливом; $V_3 = T_3$ и $V_4 = T_4$ — при шлифовании алмазным кругом без охлаждения и с охлаждением свободным поливом соответственно; $V_5 = T_5$ — при шлифовании алмазным кругом на пористой связке с ориентированными зернами без охлаждения; $V_6 = T_6$ — с охлаждением свободным поливом и $V_7 = T_7$ — с охлаждением через поры круга.

Условия экспериментов, матрица планирования и полученные результаты представлены в табл. 7.4 и 7.5.

Табл. 7.4.
Условия экспериментов.

Уровень факторов	Фактор					
	V, м/с		S, м/мин		t, мм	
	X ₁	ln V	X ₂	ln S	X ₃	ln r
Верхний (+1)	40	3,689	3,0	1,099	0,02	-3,912
Нижний (-1)	20	2,966	1,5	0,405	0,01	-4,605

Обработку полученных результатов производили по аналогии с выполненной ранее. Она позволила получить следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= e^{7,47} \cdot V^{0,377} \cdot S^{0,32} \cdot t^{0,495}; & T_2 &= e^{7,25} \cdot V^{0,388} \cdot S^{0,236} \cdot t^{0,486}; \\
 T_3 &= e^{7,24} \cdot V^{0,318} \cdot S^{0,463} \cdot t^{0,473}; & T_4 &= e^{6,98} \cdot V^{0,575} \cdot S^{0,29} \cdot t^{0,63}; \\
 T_5 &= e^{7,26} \cdot V^{0,176} \cdot S^{0,467} \cdot t^{0,419}; & T_6 &= e^{6,88} \cdot V^{0,552} \cdot S^{0,293} \cdot t^{0,648}; \\
 T_7 &= e^{6,79} \cdot V^{0,352} \cdot S^{0,151} \cdot t^{0,519}.
 \end{aligned} \tag{7.7}$$

Используя (7.7), рассчитали контактную температуру при обработке покрытия, полученного ЭМН с ППД, для различных типов кругов, способов охлаждения и режимов шлифования (табл. 7.6). Анализ результатов исследований (табл. 7.6 и рис. 7.10) показывает, что марка шлифовального круга и способ охлаждения значительно влияют на контактную температуру. Так, при шлифовании алмазным кругом на пористой связке при одном и том же режиме без охлаждения температура в зоне резания по сравнению со шлифованием абразивным и обычным алмазным кругами меньше соответственно на 260 и 100°C, а при охлаждении поливом — на 270 и 110°C. При подаче СОЖ через поры круга эта разница для исследуемых кругов, работающих при одном и том же режиме с охлаждением поливом, соответственно равна 330 и 190°C.

Табл. 7.5.
Матрица планирования и результаты экспериментов (обработка покрытий, полученных ЭМН с ППД).

Номер опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Контактная температура, °С							
					y ₁ /ln y ₁	y ₂ /ln y ₂	y ₃ /ln y ₃	y ₄ /ln y ₄	y ₅ /ln y ₅	y ₆ /ln y ₆	y ₇ /ln y ₇	
1	+	-	-	-	636/6,46	520/6,25	504/6,22	340/5,83	421/6,04	290/5,67	220/5,39	
2	+	-	+	-	810/6,70	615/6,42	740/6,61	445/6,10	608/6,41	330/5,80	240/5,48	
3	+	-	-	+	862/6,76	740/6,61	635/6,95	615/6,42	554/6,32	460/6,13	410/6,02	
4	+	-	+	+	1104/7,01	910/6,81	932/6,84	740/6,61	830/6,72	590/6,38	443/6,09	
5	+	+	-	-	860/6,76	735/6,60	590/6,38	620/6,43	490/6,19	450/6,11	360/5,89	
6	+	+	+	-	940/6,85	800/6,68	810/6,70	680/6,52	670/6,51	528/6,27	400/5,89	
7	+	+	-	+	1126/7,03	940/6,85	952/6,85	788/6,67	688/6,53	620/6,43	390/5,97	
8	+	+	+	+	1532/7,33	1142/7,04	1174/7,07	1020/6,93	850/6,75	815/6,70	453/6,12	

Табл. 7.6.
Зависимость контактной температуры от конструкции круга, способа охлаждения и режима шлифования.

Режим шлифования	Контактная температура, °С												
	Абразивный круг				Алмазный круг				Алмазный круг на пористой связке с ориентированными зёрнами				
	без охлаждения	охлаждение поливом	3	2	без охлаждения	охлаждение поливом	5	4	без охлаждения	охлаждение поливом	6	7	
1													8
V ₁ =20; S=1,5; t=0,015			771,18	645,96	599,51	480,75	510,57	376,84	306,17				
V ₂ =25; S=1,5; t=0,015			838,86	704,36	643,70	546,53	531,08	426,25	331,18				
V ₃ =30; S=1,5; t=0,015			898,56	755,97	682,22	600,02	542,45	471,80	353,12				
V ₄ =35; S=1,5; t=0,015			952,33	802,55	716,57	663,14	563,57	513,27	372,81				
V ₅ =40; S=1,5; t=0,015			1001,51	845,20	747,73	716,04	577,01	552,55	390,74				
S ₁ =1,0; V=30; t=0,015			789,35	687,02	564,57	539,55	453,75	418,65	332,11				
S ₂ =1,5; V=30; t=0,015			898,56	755,96	682,22	606,92	548,45	471,39	353,12				
S ₃ =2,0; V=30; t=0,015			985,09	809,04	780,27	659,76	627,39	512,81	368,83				
S ₄ =2,5; V=30; t=0,015			1057,91	857,71	865,93	703,89	696,38	547,41	381,50				
S ₅ =3,0; V=30; t=0,015			1121,39	890,25	942,86	748,14	758,33	577,41	392,17				

Табл. 7.6 (окончание).

1	2	3	4	5	6	7	8
$t_1=0,010; V=30; S=1,5$	753,21	620,84	563,17	470,12	462,66	362,46	286,07
$t_2=0,010; V=30; S=1,5$	898,56	755,97	682,22	606,92	548,45	471,39	353,12
$t_3=0,010; V=30; S=1,5$	1035,99	869,33	781,65	727,49	618,80	508,02	410,03
$t_4=0,010; V=30; S=1,5$	1156,99	968,84	868,65	837,29	679,52	656,40	460,41
$t_5=0,010; V=30; S=1,5$	1256,11	1058,54	946,81	939,19	733,54	738,74	506,13

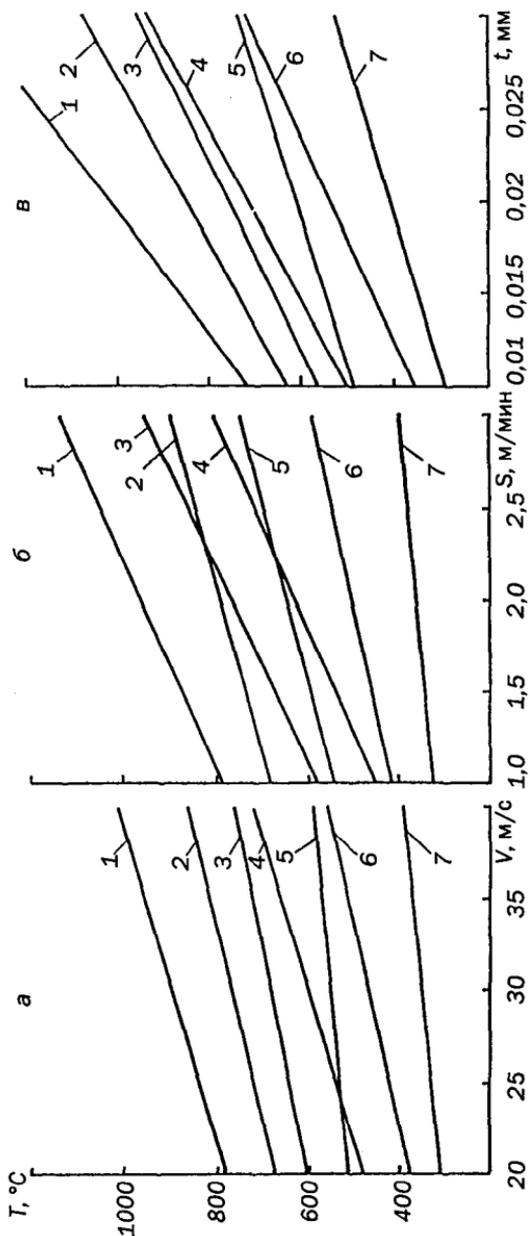


Рис. 7.10. Зависимость контактной температуры от окружной скорости круга V (а), поперечной подачи S (б), глубины шлифования t (в) и способа охлаждения: 1) абразивный круг, без охлаждения; 2) абразивный, охлаждение поливом; 3) алмазный, без охлаждения; 4) алмазный, охлаждение поливом; 5) алмазный на пористой связке, без охлаждения; 6) алмазный на пористой связке, охлаждение поливом; 7) алмазный на пористой связке, охлаждение через поры.

Необходимо отметить, что влияние способа охлаждения на контактную температуру возрастает при более интенсивном режиме шлифования не только для абразивного и алмазного кругов, но и для алмазного на пористой связке. Из полученных данных (табл. 7.6, рис. 7.10) видно, что при шлифовании алмазным кругом на пористой связке и подаче СОЖ через поры абсолютная контактная температура находится в пределах 300—500°C, что ниже температуры графитизации алмаза. При подаче СОЖ поливом и скорости круга до 30 м/с контактная температура не превышает 500°C (табл. 7.6, рис. 7.10, а).

Полученные результаты исследований позволяют определить режимы шлифования электромагнитных покрытий, при которых температура в зоне резания не превышает 500°C. Так, при шлифовании алмазным кругом на пористой связке с ориентированными зернами и охлаждением через поры круга наиболее приемлем следующий режим:

$$V = 30 \text{ м/с}; S = 2 \text{ м/мин}; t = 0,015 \text{ мм};$$

при охлаждении поливом

$$V = 25 \text{ м/с}; S = 1,5 \text{ м/мин}; t = 0,01 \text{ мм}.$$

Для обычного алмазного круга с охлаждением поливом

$$V = 20 \text{ м/с}; S = 1 \text{ м/мин}; t = 0,01 \text{ мм};$$

для абразивного круга с охлаждением поливом

$$V = 20 \text{ м/с}; S = 1 \text{ м/мин}; t = 0,005 \text{ мм}.$$

Экспериментальная проверка работы по температурному режиму исследуемых конструкций шлифовальных кругов, эффективных режимов шлифования поверхностей с покрытиями, полученными ЭМН, и рассмотренных методов охлаждения показала, что для всех конструкций кругов температура в зоне шлифования не превышала 500°C. Самой низкой, равной 325°C, была температура при шлифовании алмазным кругом на пористой связке с ориентированными зернами и охлаждением через поры круга.

Таким образом, показана высокая эффективность применения алмазных кругов на пористой связке с ориентированными зернами и подачей СОЖ через поры круга для снижения температуры в зоне шлифования. При этом по сравнению с абразивным кругом, алмазным и алмазным на пористой связке с

ориентированными зернами и подачей СОЖ поливом обеспечивается снижение температуры соответственно в 2,18, 1,73 и 1,38 раза, которая не превышает порог теплостойкости алмаза, что позволяет применять алмазное шлифование при обработке покрытий, полученных ЭМН с ППД.

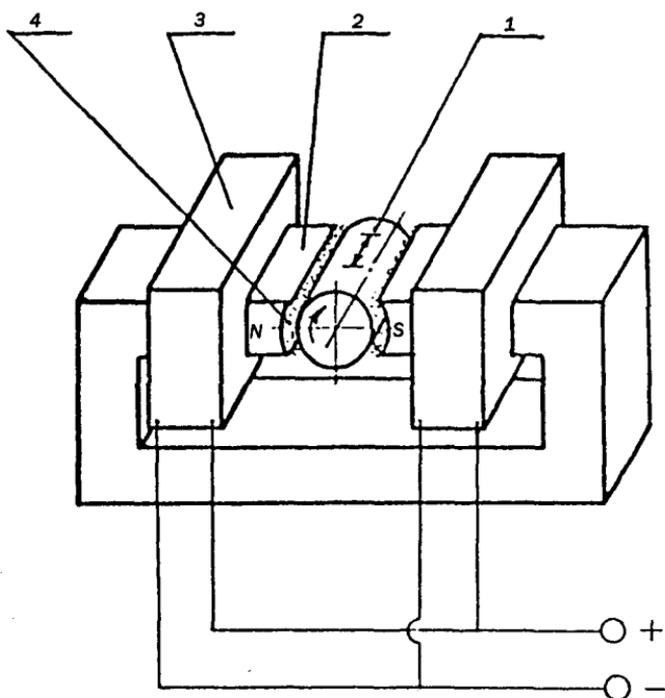
7.4. Магнитно-абразивная обработка покрытий

Разработан метод абразивной обработки, основанный на использовании энергии магнитного поля [3]. Метод магнитно-абразивной обработки (МАО) значительно расширяет возможности современной технологии машиностроения.

Схема МАО цилиндрических деталей приведена на рис. 7.11. Обрабатываемая деталь 1 помещается между полюсными наконечниками 2 электромагнита 3 с зазорами, в которые подается порошок 4, обладающий магнитными и абразивными свойствами. Механическим приводом детали сообщается вращательное движение и движение вдоль горизонтальной оси (осциллирование). Силами магнитного поля зерна порошка удерживаются в рабочих зазорах, прижимаются к поверхности детали, и таким образом производится ее обработка. В рабочую зону подается СОЖ, являющаяся носителем поверхностно-активных веществ. Она обеспечивает возникновение процесса электролиза, в ходе которого происходит частичное растворение поверхности изделия. В данном случае функции силового источника и упругой связки выполняет энергия постоянного магнитного поля. Степень упругой связки легко регулируется изменением напряженности магнитного поля, что позволяет рассматривать МАО как процесс шлифования связанным или свободным абразивом и тем самым использовать преимущества каждого из них в одном рабочем цикле.

МАО представляет собой избирательное абразивное микрорезание и микровыглаживание. Сущность этого процесса состоит в том, что при сравнительно больших величинах микровыступов зерна порошка контактируют преимущественно с вершинами гребешков, являющихся концентраторами магнитных силовых линий. Каждый рабочий элемент (зерно) в магнитном поле устанавливается наибольшей осью по направлению к обрабатываемой поверхности. При износе и затуплении вершин происходит переориентация элемента таким

образом, что вновь образовавшаяся наибольшая ось направляется вдоль магнитных силовых линий. В результате обработки поверхности детали производится острыми кромками, т. е. имеет место процесс ориентированного абразивного резания.



*Рис. 7.11. Схема магнитно-абразивной обработки поверхностей тел вращения:
 1 — обрабатываемая деталь; 2 — полюсный наконечник;
 3 — электромагнит; 4 — порошок.*

Особенностями МАО являются непрерывный контакт порошка с обрабатываемой поверхностью детали, что дает возможность снизить циклические нагрузки на систему станок-приспособление-инструмент-деталь. Отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке, способствующее самопроизвольному нивелированию режущего инструмента относительно формы обрабатываемой поверхности, устраняет вероятность появления в зоне резания критических давлений и температур и повышает физико-механические свойства

поверхности изделия. Одновременно появляется возможность управлять жесткостью инструмента, регулировать съем металла с формообразующей поверхности изделия и обеспечивать возможность резания наиболее острой кромкой зерна магнитно-абразивного порошка. Процесс позволяет осуществлять безразмерную (декоративную) обработку, обеспечивающую за 10—120 с съем металла или сплава 0,02—0,5 мм на диаметр; снижать шероховатость Ra с 1,25—0,32 до 0,08—0,01 или с 10,0—2,5 до 0,32—0,08 мкм; сохранять геометрические размеры детали в пределах допуска предшествующей операции, исключать засаливание инструмента, что обеспечивает полирование мягких и вязких материалов.

Особо следует отметить, что МАО можно проводить на устройствах для ЭМН, так как в устройствах, реализующих эти процессы, силовым источником и упругой связкой абразивного инструмента и микроэлектродов является энергия постоянного магнитного поля. Выполнение различных процессов на одном оборудовании позволяет повысить коэффициент использования последнего.

При рассмотрении обрабатываемости покрытий, полученных ЭМН с ППД, приведен пример оптимизации магнитно-абразивной обработки, применяемой в качестве финишной операции. Оптимизация проводится с применением метода математического планирования экспериментов. Применялся центральный композиционный ротатбельный униформ-план второго порядка. В качестве параметров оптимизации процесса выбраны: Ra — шероховатость поверхности после обработки, мкм; Q — съем материала покрытия, мг. Независимыми переменными являлись следующие факторы: V — окружная скорость образца, м/с; τ — время обработки, с; A — амплитуда осцилляции, мм; B — величина магнитной индукции и рабочем зазора, Т; δ — величина рабочего зазора, мм.

Постоянными факторами при экспериментах были: магнитно-абразивный порошок Ж15КТ зернистостью 180/160; СОЖ — 50%-й раствор эмульсола Э2 в воде; скорость осцилляции образца $V_0 = 0,2$ м/с. Образцами служили заготовки из стали 45 с покрытием, полученным ЭМН с ППД порошка Р6М5К5 зернистостью 250/180. Диаметр образцов $d = 40$ мм, твердость покрытия 50—54 HRC. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности $Ra = 1,25$ мкм получена на операции шлифования.

Обработка результатов экспериментов, полученных по матрице ЦКРУП второго порядка, на ЭВМ позволила получить модели процесса MAO покрытия, полученного ЭМН с ППД.

Модель, определяющая характер зависимости шероховатости поверхности покрытия от технологических факторов, имеет вид

$$\begin{aligned}
 Y_1 = Ra = & 0,82 - 0,011X_1 - 0,031X_2 + 0,006X_3 - 0,006X_4 + \\
 & + 0,022X_5 - 0,001X_1X_2 - 0,003X_1X_3 + 0,006X_1X_4 - \\
 & - 0,004X_1X_5 - 0,007X_2X_3 - 0,017X_2X_4 - 0,005X_2X_5 + \\
 & + 0,002X_3X_4 - 0,002X_3X_5 + 0,009X_4X_5 + 0,005X_1^2 + \\
 & + 0,019X_2^2 + 0,003X_3^2 + 0,001X_4^2 + 0,009X_5^2.
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

Модель, определяющая характер зависимости съема материала покрытия от технологических факторов, представляет собой

$$\begin{aligned}
 Y_2 = Q = & 148,40 + 10,38X_1 + 26,23X_2 + 0,21X_3 + 25,06X_4 - \\
 & - 20,22X_5 - 0,44X_1X_2 + 1,56X_1X_3 + 2,81X_1X_4 + \\
 & + 7,56X_1X_5 + 0,19X_3X_4 + 5,94X_3X_5 + 9,19X_4X_5 - \\
 & - 5,33X_1^2 - 0,12X_2^2 - 2,34X_3^2 - 0,46X_4^2 + 1,66X_5^2.
 \end{aligned} \tag{7.9}$$

Определение влияния факторов MAO V , τ , A , B , δ на величину Ra и производительность Q процесса, а также оптимизацию режима производили по моделям (7.8) и (7.9).

Графически модели (7.8) и (7.9) представляли при помощи одномерных сечений функций отклика Y_1 и Y_2 (рис. 7.12). Для этого из общей модели для параметров процесса составлялось уравнение регрессии, которое включало две переменные, исследуемый технологический фактор (аргумент) и функцию отклика. При этом значения всех остальных факторов стабилизировались на нулевых уровнях для данной матрицы.

Анализ полученных моделей (7.8) и (7.9) и рис. 7.12 позволил выявить степень влияния факторов на параметры оптимизации. Влияние технологических факторов на шероховатость поверхности Ra в порядке убывания их значимости можно расположить в следующий ряд: $\tau \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow B \rightarrow A$, а съем материала покрытия $Q \rightarrow \tau \rightarrow B \rightarrow \delta \rightarrow V \rightarrow A$.

Время обработки τ оказывает наибольшее влияние на процесс (рис. 7.12, б). Оно складывается из продолжительности воздействий большого

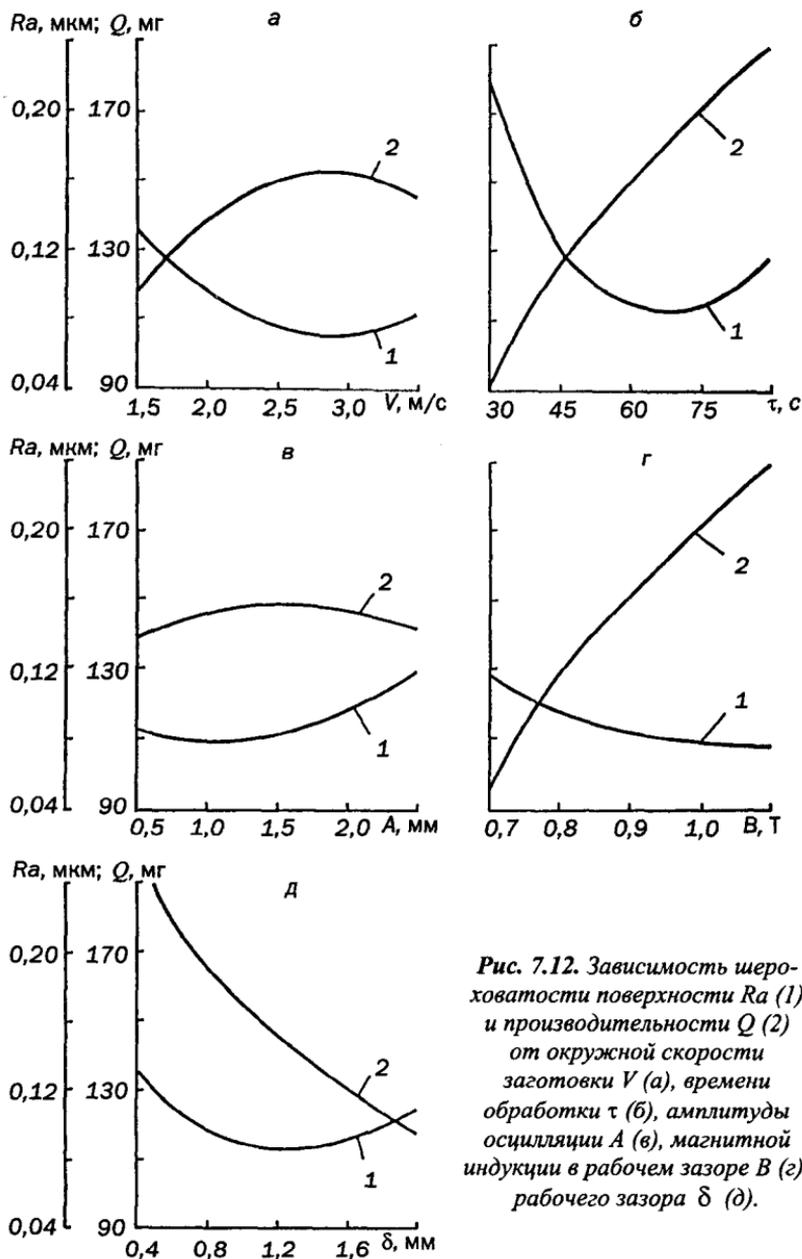


Рис. 7.12. Зависимость шероховатости поверхности Ra (1) и производительности Q (2) от окружной скорости заготовки V (а), времени обработки τ (б), амплитуды осцилляции A (в), магнитной индукции в рабочем зазоре B (г), рабочего зазора δ (д).

количества взаимосвязанных энергией магнитного поля зерен порошка на обрабатываемую поверхность и тех микропроцессов механического, электромагнитного и электрохимического характера, которые сопровождают МАО. Влияние этого фактора связано с изменением числа контактирующих зерен, зависящих от количества порошка и его распределения в рабочем зазоре, угла охвата обрабатываемой детали полюсными наконечниками и т. д. Из рис. 7.12, б видно, что оптимальным является время обработки $50 < \tau < 70$ с.

Величина рабочего зазора δ определяет длину цепочек зерен порошка и влияет на их жесткость. При уменьшении рабочего зазора возрастает жесткость порошка, что приводит к увеличению сил резания. Наименьший рабочий зазор должен превышать величину зерна. Увеличение рабочего зазора приводит к снижению эффективности процесса и росту расхода порошка. Анализ зависимостей, представленных на рис. 7.12, д показывает, что наиболее эффективен рабочий зазор $1 < \delta < 1,6$ мм.

Окружная скорость детали V во многом определяет механику процесса и протекание сопутствующих ему электромагнитных и электрохимических явлений. Скорость V — это путь, пройденный единичным зерном относительно поверхности детали в единицу времени, и, соответственно, она оказывает влияние на кинематику и динамику процесса, а также на величину вихревых токов, индуцируемых деталью, и микротоков, индуцируемых зернами порошка, и определяет процесс перемагничивания детали. Зависимость R_a и Q от окружной скорости вращения детали V носит экстремальный характер (рис. 7.12, а). Результаты показали, что наиболее эффективно для МАО применять окружную скорость вращения детали в пределах $2,5 < V < 3,5$ м/с.

Магнитная индукция — технологический фактор, определяющий процесс МАО. Она является силовой характеристикой магнитного поля и ее влияние на МАО складывается из воздействия на силы абразивного резания и на электромагнитные и электрохимические явления в зоне обработки. Удельная плотность порошка в рабочем зазоре, а, следовательно, количество контактирующих с обрабатываемой поверхностью зерен определяется величиной магнитной индукции. С ростом магнитной индукции в рабочем зазоре увеличивается жесткость порошка и возрастают силы резания. Об этом свидетельствует влияние, которое оказывает магнитная индукция B на съем материала

покрытия (рис. 7.12, г). Однако влияние B на шероховатость поверхности не существенно (рис. 7.12, г). Обусловлено это тем, что зерна порошка, прижимаемые к обрабатываемой поверхности, имеют дополнительные степени свободы движений и вращаются под действием образующихся моментов резания и трения. Аналогичные движения зерна получают при осцилляции детали. Из анализа зависимостей (рис. 7.12, г) видно, что наиболее благоприятной является магнитная индукция в рабочем зазоре, равная $0,9—1,1$ Т.

Амплитуда осцилляции детали A оказывает не очень существенное влияние на процесс. Движение осцилляции предназначено для придания зернам порошка перемещений относительно обрабатываемой поверхности, при которых они не имели бы возможности попадать в ранее образованные ими бороздки. Амплитуда осцилляции наряду с относительной скоростью вращения детали V и скоростью осцилляции V_0 является фактором, определяющим это движение. При осцилляции зерна эллипсоидальной формы активно используют всю свою поверхность, что приводит к снижению шероховатости и повышению съема материала покрытия. При этом следы обработки на поверхности носят хаотический характер. Наиболее интенсивно процесс обработки происходит при $1 < A < 2$ мм.

Для определения оптимального режима процесса МАО покрытий, полученных ЭМН с ППД, решали задачу с двумя параметрами оптимизации. Для этого применяли метод перебора различных вариантов, который позволяет решать компромиссные задачи поиском условного экстремума по математическим моделям (7.8) и (7.9). Используя комплексный показатель параметров оптимизации МАО покрытия, за который была принята обобщенная функция желательности Харрингтона, методом спирального координатного спуска получен оптимальный режим: $\tau = 60$ с; $\delta = 1,4$ мм; $V = 3$ м/с; $B = 1$ Т; $A = 1,5$ мм.

МАО партии заготовок с покрытиями, полученными ЭМН с ППД и имеющими исходную шероховатость поверхности $Ra = 1,25—1,6$ мкм и твердость $50—56$ HRC, на оптимальном режиме обеспечила шероховатость поверхности $Ra = 0,08$ мкм. При этом на обрабатываемых поверхностях не наблюдалось шаржирования и прижогов поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. В., Потапов В. Д. Основы теории упругости и пластичности. — М.: Высшая школа, 1990. — 400 с.
2. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.
3. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. — Л.: Машиностроение, 1986. — 176 с.
4. Бачин В. А., Квасницкий В. Ф., Котельников Д. И. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки. — М.: Машиностроение, 1991. — 352 с.
5. Белый А. В., Макушок Е. М., Поболь И. Л. Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии. — Мн.: Навука і тэхніка, 1990. — 179 с.
- ✓ 6. Витязь П. А., Ивашко В. С., Манойло Е. Д. и др. Теория и практика газопламенно-го напыления. — Мн.: Навука і тэхніка, 1993. — 295 с.
7. Волосенков В. Е., Куприянов И. Л. Порошки для газотермических покрытий. — Мн.: Вышэйшая школа, 1990. — 27 с.
8. Емельянов В. А., Иванов И. А., Мрочек Ж. А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. — Мн.: НПО «Интеграл», 1998. — 285 с.
9. Захаренко П. В., Волкогон В. М., Бочко А. В. и др. Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвердых материалов. — Киев: Наукова думка, 1991. — 288 с.
10. Ивашко В. С., Куприянов И. Л., Шевцов А. И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. — Мн.: Навука і тэхніка, 1996. — 375 с.
11. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. — М.: Высшая школа, 1991. — 319 с.
12. Кожуро Л. М., Чемисов Б. П. Обработка деталей машин в магнитном поле. — Мн.: Навука і тэхніка, 1995. — 232 с.
13. Кожуро Л. М., Чистосердов П. С., Ремизовский Э. И. и др. Шлифование металлов. — Мн.: Дизайн ПРО, 2000. — 352 с.
14. Колесников К. С., Баландин Г. Ф., Дальский А. М. и др. Технологические основы обеспечения качества машин. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с.
15. Кряжков В. М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники. — М.: Агропромиздат, 1989. — 335 с.

16. Куприянов И. Л., Геллер М. А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. — Мн.: Навука і тэхніка, 1990. — 176 с.
17. Меликов В. В. Многоэлектродная наплавка. — М.: Машиностроение, 1988. — 144 с.
18. Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Марков Г. В. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. — Мн.: Навука і тэхніка, 1991. — 96 с.
19. Пантелеенко Ф. И., Любецкий С. Н. Самофлюсующиеся порошки и износостойкие покрытия из них. — Мн.: БелНИИНТИ, 1991. — 59 с.
20. Пацкевич И. Р., Рябов В. Р., Деев Г. Ф. Поверхностные явления при сварке металлов. — Киев: Наукова думка, 1991. — 240 с.
21. Петруха П. Г., Марков А. И., Беспяхотный П. Д. и др. Технология обработки конструкционных материалов. — М: Высшая школа, 1991. — 512 с.
22. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. — М.: Машиностроение, 1990. — 288 с.
23. Рыжов Э. В., Аверченков В. И., Оптимизация технологических процессов механической обработки. — Киев: Наукова думка, 1989. — 192 с.
24. Рыжов Э. В., Клименко С. А., Гуцаленко О. Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. — Киев: Наукова думка. 1994. — 184 с.
25. Чистосердов П. С., Чемисов Б. П., Кожуро Л. М., Акулович Л. М. Технология размерно-чистовой и упрочняющей обработки. — Мн.: Университетское, 1993. — 188 с.
26. Ящерицын П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. — Мн.: Вышэйшая школа, 1990. — 512 с.
27. Ящерицын П. И., Хейфец М. Л., Чемисов Б. П. и др. Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей. — Новополоцк: Изд-во ПГУ, 1996. — 136 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	5
1.1. Современные методы восстановления и упрочнения деталей машин наплавкой	7
1.2. Электромагнитная наплавка.....	21
1.3. Требования к методам восстановления и упрочнения.....	30
2. КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ	33
2.1. Явления, происходящие в рабочей зоне устройств для электромагнитной наплавки	33
2.2. Магнитное поле и его роль при электромагнитной наплавке	37
2.3. Управление процессом возбуждения электрического разряда при электромагнитной наплавке.....	45
2.4. Модели деформационных процессов наплавленных поверхностей.....	55
2.5. Поля напряжений при пластическом деформировании наплавленных поверхностей	59

3.	ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОКРЫТИЕ—ОСНОВА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ	63
3.1.	Температурные поля при электромагнитной наплавке	63
3.2.	Аналитический метод расчета остаточных напряжений в системе покрытие—основа	76
3.3.	Определение упругих характеристик покрытий.....	98
3.4.	Расчетно-экспериментальное определение остаточных напряжений в покрытии и основе	101
4.	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	109
4.1.	Классификация и область использования методов упрочнения деталей машин	109
4.2.	Механика контактного взаимодействия поверхностей	113
4.3.	Кинематика и динамика деформирующего элемента	124
5.	СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ.....	139
5.1.	Порошковые материалы. Структура и свойства.....	139
5.2.	Структура, фазовый состав и свойства покрытий, сформированных ЭМН.....	166
5.3.	Микротвердость покрытий	181
5.4.	Рентгеноструктурный анализ покрытий.....	187
5.5.	Внутренние остаточные напряжения покрытий.....	192

5.6.	Износостойкость покрытий	195
5.7.	Усталостная прочность наплавленных поверхностей.....	200
6.	ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ.....	203
6.1.	Математические модели технологического процесса	203
6.2.	Влияние технологических факторов на основные показатели процессов.....	208
6.3.	Оптимизация технологических факторов.....	221
7.	ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ПОКРЫТИЙ	227
7.1.	Характеристики обрабатываемости материалов и способы их определения	228
7.2.	Шлифование покрытий абразивными кругами	233
7.3.	Шлифование поверхностей с покрытиями кругом на пористой металлической связке с ориентиро- ванными алмазными зернами	247
7.4.	Магнитно-абразивная обработка покрытий	255
	ЛИТЕРАТУРА.....	263

Учебное издание

МРОЧЕК Жорж Адамович
КОЖУРО Лев Михайлович
ФИЛОНОВ Игорь Павлович

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Ответственный за выпуск *Аношко А. П.*
Технический редактор *Страусова Л.*

Подписано в печать с готовых диапозитивов 26.02.2001.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 15,6. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная. Тираж 1000. Заказ 212.

Налоговая льгота – Общегосударственный классификатор
Республики Беларусь ОКРБ 007-98, ч. 1; 22.11.20.100

Издатель: УП «Технопринт».

Лицензия ЛВ № 380.

220027, Минск, пр. Ф. Скорины, 65, корп. 14, оф. 215.
тел. 231-86-93, 239-91-57

Республиканское унитарное предприятие
«Издательство «Белорусский Дом печати».
220013, Минск, пр. Ф. Скорины, 79.

ISBN 985-6373-74-3



9 789856 373742