

Литература

1. Оплавление порошкового материала при теплообмене с деталью, нагреваемой электрическим током / Ю.Н. Гафо [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2002. – № 1. – С. 48–50.

2. Белявин, К.Е. Расчет допустимой прочности сцепления износостойких покрытий зубьев роторных почвообрабатывающих машин при соударении с камнем / К.Е. Белявин, А.В. Сосновский, О.А. Баран // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 1. – С. 53–56.

3. Гринберг, Г.А. Об одном возможном методе подхода к рассмотрению задач теории теплопроводности, диффузии, волновых и им подобных при наличии движущихся границ и о некоторых иных его приложениях / Г.А. Гринберг // Прикладная математика и механика. – 1967. – Т. 31. – С. 193–203.

УДК 669.041:621.785

**П.С. ГУРЧЕНКО, д-р техн. наук (БНТУ),
А.А. СОЛОНОВИЧ (ОАО «МПЗ»),
Т.Н. СИНИЧЕНКО (БНТУ)**

ПУТИ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Повышение эксплуатационных свойств деталей машиностроения в условиях возрастающих нагрузок на узлы и агрегаты вследствие увеличения их мощности, скорости и грузоподъемности и других параметров эксплуатации может быть достигнуто либо применением новых сложнелегированных сталей и сплавов, которые ведут к значительному удорожанию продукции, либо совершенствованием технологии термической и химико-термической обработки традиционных конструкционных сталей, что также приводит к увеличению трудовых, материальных и энергетических затрат. Однако существуют методы упрочнения традиционных недорогих материалов, позволяющие значительно повысить прочность и

долговечность деталей машин при одновременном снижении их себестоимости. К таким методам относится поверхностная и объемно-поверхностная закалка изделий из недорогих углеродистых сталей с использованием индукционного нагрева, а также совмещение процессов кузнечной и термической обработки заготовок.

Кузнечно-термическое производство является одним из самых энергоемких, поэтому на данном переделе экономия энергоресурсов имеет особое значение. Применение индукционного нагрева для процессов обработки давлением позволяет обеспечивать значительную экономию ресурсов при одновременном повышении качества продукции. Индукционный нагрев не требует длительного разогрева оборудования – детали под ковку разогреваются и подаются к рабочему месту кузнеца в течение 2–3 мин после включения оборудования. Индукционные установки для нагрева под ковку либо штамповку по сравнению с газовым печным нагревом за счет отсутствия необходимости разогрева массивных элементов печного оборудования, неограниченно высоких скоростей нагрева (от нескольких секунд до нескольких минут) позволяют снизить затраты потребления энергоресурсов на нагрев заготовок, предотвратить обезуглероживание и угар металла, решить проблему предотвращения брака при нагреве под ковку, связанную с перегревом (структура видманштетта), а также значительно снизить трудоемкость операций. При индукционном нагреве легко решается проблема поштучной автоматизированной загрузки заготовок в нагревательное оборудование и их поштучной подачи в рабочую зону формообразующего инструмента. При этом ликвидируется особо вредное и тяжелое рабочее место нагревальщика.

Как указано в работах [1, 2], при использовании индукционного нагрева дополнительную экономию энергоресурсов можно получить за счет совмещения некоторых операций обработки, например, операции горячей обработки металлов давлением и термической обработки (термомеханическая обработка). Объединение вышеперечисленных операций изготовления деталей не всегда возможно, но в тех случаях, когда удастся это сделать одновременно с обеспечением необходимых физико-механических свойств деталей, обеспечивается значительный экономический эффект, что подтверждено

экспериментальными работами, проведенными на Минском автомобильном заводе (ОАО «МАЗ») [3] и Минском подшипниковом заводе (ОАО «МПЗ»).

Как известно [4], в процессе пластической деформации исходная структура металла изменяется, повышается плотность дефектов кристаллического строения, зерна изменяют свою форму от действующих сил. Внутри зерен образуются плотные полосы скольжения дислокаций, которые дробят их на отдельные блоки. Изменение структуры сопровождается повышением пределов прочности и текучести, увеличением твердости и снижением пластичности.

При большой степени пластической деформации появляется определенная ориентировка зерен, называемая текстурой деформации, она вызывает анизотропию физико-механических свойств металлов и сплавов.

Известно [5], что состояние металлов и сплавов после наклепа является неравновесным. Поэтому в нагретом состоянии их структура, а, следовательно, и свойства изменяются, так как происходит переход к более стабильному состоянию. При высоких температурах подвижность атомов среди деформированных зерен высока и происходит зарождение и рост новых зерен с неискаженной решеткой и меньшей плотностью дефектов. Этот процесс сопровождается понижением пределов прочности и текучести, уменьшением твердости и повышением пластичности металлов и сплавов. Дальнейшее повышение температуры приводит к росту образовавшихся зерен.

Деформация при высоких температурах вызывает упрочнение, однако оно снимается за счет последующей рекристаллизации в процессе охлаждения поковок. Таким образом, при горячей пластической деформации (прокатке, ковке, штамповке и т.д.) процессы упрочнения за счет наклепа непрерывно чередуются с процессами разупрочнения за счет рекристаллизации. В конечном итоге значительного упрочнения металла в поковках за счет наклепа при операциях горячего формообразования стальных заготовок не происходит.

При высокотемпературной термомеханической обработке пластической деформации подвергается устойчивый аустенит при тем-

пературах выше $A_{с3}$. В случае последующего быстрого охлаждения со скоростью, превышающей критическую, рекристаллизационные процессы пройти полностью не успевают [4] и тогда сохраняются повышенная плотность дислокаций и хорошо развитая полигонизированная структура зерен аустенита. Быстрое охлаждение при ВТМО ниже температуры M_n представляет закалку с деформационного нагрева. Образующийся мартенсит полностью наследует дислокационные субграницы горячедеформированного аустенита и имеет мелкокристаллическое строение [6]. Поэтому большим преимуществом ВТМО является то, что эта обработка одновременно обеспечивает существенное повышение прочности, пластичности и ударной вязкости, заметно превышающие эти свойства при обычной закалке. Очень важным является и то, что упрочнение, возникающее после ВТМО, наследуется при повторной термической обработке. Это значительно расширяет возможности использования такой термомеханической обработки.

Вместе с тем такие технологии могут сократить общий цикл изготовления деталей на время, необходимое для термообработки после ОМД, с освобождением площадей и оборудования, предназначенных под термообработку.

Однако нельзя забывать тот факт, что предварительную термическую обработку заготовок деталей производят, прежде всего, для улучшения обрабатываемости резанием, что в конечном итоге оказывает значительное влияние на продолжительность проведения операций механической обработки, стойкость инструмента и качество поверхности.

Понятие обрабатываемость охватывает совокупность нескольких технологических свойств материала, характеризующих его влияние на различные стороны процесса резания [7]: усилие резания и потребляемую мощность; легкость ломания и отвода стружки, определяемые ее деформацией и характером стружкообразования; возможность получения обработанных поверхностей с минимальной или заданной шероховатостью, степенью и глубиной наклепа и других характеристик качества поверхностного слоя; легкость получения необходимой точности обработки при чистовых и отделочных операциях; скорость резания, соответствующая заданному периоду

стойкости инструмента, наименьшей интенсивности изнашивания инструмента и экономичности.

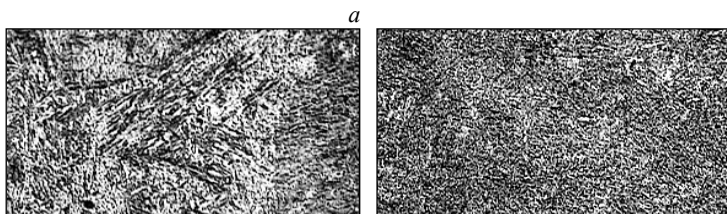
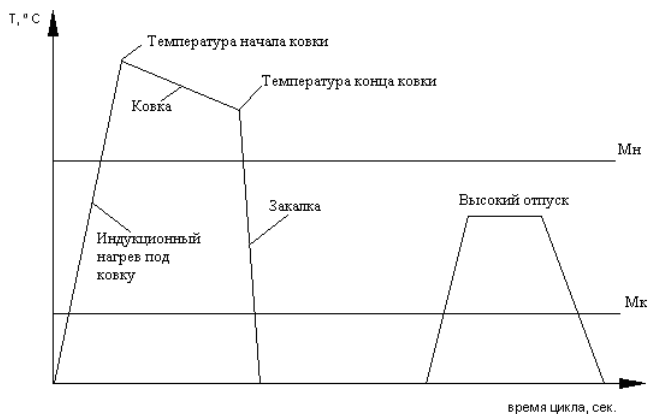
Единой универсальной характеристики обрабатываемости нет. Металл, обладающий хорошей обрабатываемостью, с точки зрения уровня целесообразных скоростей, не может иногда обеспечивать требуемой шероховатости поверхности, при этом возникают слишком большие силы резания, и наоборот. Необходимо учитывать, что оценка обрабатываемости имеет всегда относительный характер. Допускаемая скорость зависит и от свойств обрабатываемого материала, и от качества режущего инструмента. Шероховатость обработанной поверхности тесно связана с геометрическими параметрами инструмента и с условиями резания, в частности со скоростью резания, при изменении которых можно получить самые различные результаты [7].

На ОАО «МАЗ» проведены экспериментальные работы по выбору оптимальных режимов предварительной закалки с температур ковки при проведении горячей обработки давлением с последующим высоким отпуском и исследование формируемых структур и твердости заготовок. Традиционной термической обработкой для этих деталей является улучшение на твердость 241–285 НВ и структуру сорбита.

Необходимо отметить, что применение индукционного нагрева перед ковкой полностью исключило обезуглероживание и угар металла. Схема термической обработки опытных деталей приведена на рисунке 1.

В результате закалки от ковочных температур (началоковки 1250±30 °С, конецковки 1050–950 °С) получена микроструктура мартенсита с твердостью 55–56 HRC (рисунок 1, б). После отпуска (560 °С) в структуре наблюдается сорбит с твердостью 23–25 HRC (рисунок 1, в). Последующая токарная и фрезерная обработка образцов и деталей не вызвала никаких проблем.

Из опытных деталей изготовили образцы для определения ударной вязкости, временного сопротивления и относительного удлинения. Результаты испытаний сведены в таблице 1.



б – $\times 100$

в – $\times 500$

a – режим термической обработки; *б* – структура после закалки;
в – структура после отпуска 560 °С

Рисунок 1 – Схема термической обработки опытной партии детали 64221-2979030 – («палец» из стали 40X)

Таблица 1– Результаты физико-механических испытаний исследуемого образца из стали 40X после закалки с ковочной температуры и отпуска 560 °С

Номер образца	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²	Твердость образца, НВ
1	750	25,2	121,5	235
2	745	23,2	105,0	241
Справочные данные для стали 40X [8]				
*	655	16	59	212-248
* Режим упрочнения в соответствии со справочными данными: закалка – 840–860 °С (вода или масло), отпуск – 550–560 °С, сечение – до 100 мм				

Как видно из рисунка 2, излом испытанных образцов мелкозернистый и вязкий.

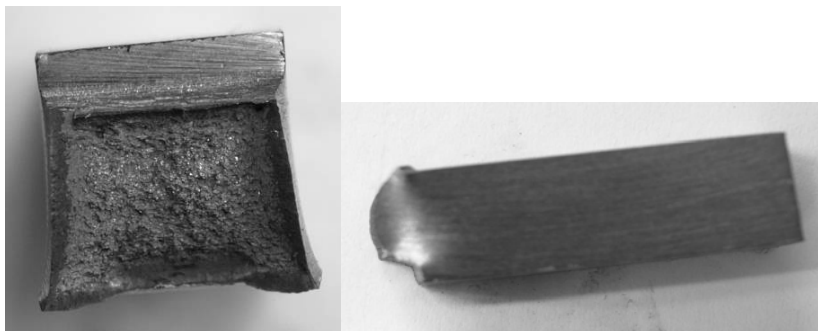


Рисунок 2 – Внешний вид излома образца из деталей, подвергнутых закалке с ковочного нагрева и последующему отпуску

Результаты испытаний показали, что физико-механические свойства деталей, подвергнутых закалке с ковочного нагрева и последующему отпуску, выше физико-механических свойств деталей, обработанных по традиционному технологическому процессу изготовления: σ_b выше на 85–95 МПа, значение δ выше на 7–9 %, КСЧ выше практически в два раза.

На ОАО «МПЗ» в настоящее время проводятся опытные работы по замене марки стали ШХ15 на У8А для изготовления колец подшипников с целью сокращения затрат на материал и термическую обработку.

Для работы выбраны кольца цилиндрического двухрядного подшипника 53610.01 и 53610.02 с наиболее простой формой и сечением \varnothing 9 мм. Используемая для опытной работы марка стали – У8А (ГОСТ 1435-99). Химический состав приведен в таблице 2.

Изготовление опытной партии поковок колец осуществляли на автоматизированной кузнечной линии Л-309 с использованием индукционного нагрева под горячую ОМД до температур 1150–1180 °С. Конецковки происходил при температурах 900–950 °С.

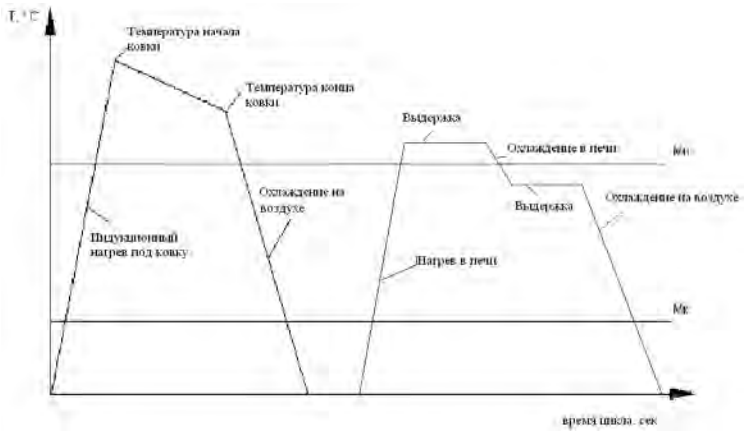
Таблица 2 – Химический состав стали У8А, примененной для колец подшипников

	Химический элемент						
	C	S	P	Ni	Cu	Mn	Si
Содержание, %	0,82	0,017	0,016	0,11	0,15	0,23	0,24
Содержание по ГОСТ 1435-99, %	0,75–0,84	не более 0,15	не более 0,025	не более 0,25	не более 0,25	0,17–0,28	0,17–0,33

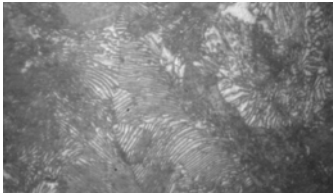
Применение индукционного нагрева исключило угар металла и образование обезуглероженного слоя в процессе нагрева под ковку. Часть поковок для предотвращения образования окалины и роста зерна аустенита ускоренно охлаждали водо-воздушной смесью до температур 750–730 °С с использованием форсунок, далее на воздухе. Затем отжиг на образцах производили по следующему режиму: нагрев до температуры 780 °С, выдержка в течение 30 мин, охлаждение в печи до температуры 680 °С, выдержка в течение 1 ч и охлаждение на воздухе. Схема термической обработки поковок колец подшипников приведена на рисунке 3, *а*. Полученная микроструктура перлита пластинчатого с включениями цементита представлена на рисунке 3, *б*. В результате отжига получена структура точечного и мелкозернистого перлита с участками пластинчатого перлита с твердостью 192 НВ (рисунок 3, *в*).

Также изготовление поковок проводилось с закалкой с температур концаковки 800–820 °С до цеховой температуры с последующей операцией высокого отпуска при температуре 650–670 °С по схеме, приведенной на рисунке 3, *а*.

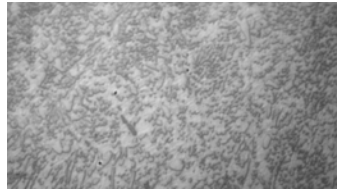
Полученная после закалки структура мартенсита крупноигльчатого с твердостью 56-57HRC приведена на рисунке 4, *а*. После высокого отпуска при температуре 650–670 °С структура представляет собой сорбит (рисунок 4, *б*) с твердостью 241–255 НВ. Обработка опытной партии колец цилиндрического двухрядного подшипника 53610.01 и 53610.02 показала отсутствие проблем по обрабатываемости резанием на всех операциях токарной обработки.



a



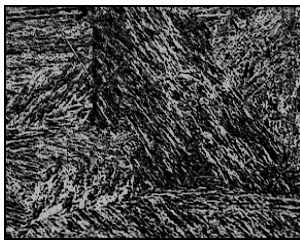
б – $\times 500$



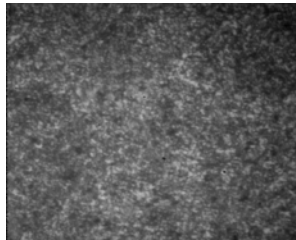
в – $\times 500$

a – режим термической обработки; *б* – микроструктура с последующим водо-воздушным охлаждением; *в* – микроструктура с последующим отжигом 780°C

Рисунок 3 – Схема термической обработки заготовки кольца подшипника из стали У8А после ОМД



a – $\times 1000$



б – $\times 500$

a – после ОМД и закалки с температур ковки; *б* – после отпуска 650–670°C

Рисунок 4 – Микроструктура заготовки из стали У8А

Традиционная предварительная термическая обработка данных деталей, изготовленных из стали ШХ15, включающая сфероидизирующий отжиг, показала мелкозернистый перлит с твердостью 179–207 НВ ГОСТ 801-78. Температурный режим отжига заготовок из сталей ШХ15, согласно действующей технологии на агрегатах СТЗ 16.105, проводится по следующим режимам: 1 зона – 800 °С, 2 зона – 810 °С, 3 зона – 810 °С, 4 зона – 740 °С, 5 зона – 680 °С, 6 зона – 600 °С, далее охлаждение на воздухе. Весь процесс отжига занимает 14,5 ч. Получаемая структура и твердость обеспечивает наилучшую обрабатываемость резанием при последующих операциях токарной обработки, однако технология является достаточно энергозатратной.

Выводы

1. Применение индукционного нагрева перед ковкой и штамповкой исключает угар металла и образование обезуглероженного слоя в процессе нагрева под ковку, позволяет легко автоматизировать поштучную загрузку заготовок и их поштучную подачу в рабочую зону формообразующего инструмента, устраняет инерционность операции нагрева.

2. Применение углеродистых низкопрокаливаемых сталей типа 60ПП или У8А позволяет снизить себестоимость продукции не только за счет стоимости стали, но и за счет снижения затрат на термообработку.

3. Применение предварительной термической обработки с использованием температуры концаковки заготовок позволит значительно сократить расходы топливно-энергетических ресурсов, времени и трудоемкости при изготовлении деталей машин.

Литература

1. **Гуринович, В.А.** Роль регулируемого охлаждения заготовок в процессе горячего формообразования – как метод получения заданных свойств деталей автомобилей / В.А. Гуринович, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк // Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование и технология изготовления: сб. науч. тр. конф., Минск, 6–10 декабря 2004 г.: в 7 т. / Под ред. П.А. Витязя. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – Вып. 2, т. 4. – С. 11–16.

2. Гуринович, В.А. Регулируемое охлаждение заготовок в процессе горячего формообразования деталей автомобиля / В.А. Гуринович, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк // Автомобильная промышленность. – 2007. – № 4. – С. 27–29.

3. Гурченко, П.С. Резервы энергосбережения при термической обработке поковок деталей автотехники МАЗ с индукционного нагрева / П.С. Гурченко, А.А. Солонович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23-24 мая: в 3 т. / Белорус. национ. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 259–260.

4. Материаловедение / А.М. Адашкин [и др.]; под ред. Ю.М. Соколоменцева. – М.: Высш. шк., 2005. – 456 с.

5. Гуляев, А.Л. Металловедение / А.Л. Гуляев. – М.: Metallurgia, 1986. – 544 с.

6. Смагоринский, М.Е. Термопластическая обработка металлов в условиях циклически изменяющихся температур / М.Е. Смагоринский. – М.: Metallurgia, 1992. – 254 с.

7. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов / П.И. Ящерицын. – М.: Высш. шк., 1990. – 512 с.

8. Колосков, М.М. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский. – М.: Машиностроение, 2001, – 672 с.

УДК 669.041

И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ (БНТУ)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АЛГОРИТМА РАСЧЕТА НАГРЕВА СТАЛИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Теплотехнология производства стальных изделий на металлургических и машиностроительных предприятиях включает различ-