

17. Сафонов, Е. Н. Закалка поверхностного слоя деталей машин плазменной дугой прямого действия / Е. Н. Сафонов, И. С. Дружинин, Н. В. Орлова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 9. – С. 23–30.

18. Поверхностное упрочнение сталей плазменной закалкой / В. А. Линник [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1983. – № 4. – С. 2–4.

19. Коротков, В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, А. В. Шакуров // Сварочное производство. – 2012. – № 3. – С. 23–27.

20. Немчинский, А. Л. Тепловые расчеты термической обработки / А. Л. Немчинский. – Л. : Судпром, 1953. – 106 с.

21. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.

22. Веремейчик, А. И. Температурное поле в ноже гильотинных ножниц при действии движущегося нормально-кругового источника нагрева / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сборник статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : Издательство БрГТУ, 2022. – С. 188–193.

23. Веремейчик, А. И. Температурное поле в ноже гильотинных ножниц при локальной поверхностной плазменной закалке / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич // Актуальные проблемы прочности: материалы междунар. науч. конф., г. Минск, 23–27 мая 2022 г. / под ред. В. В. Рубаник. – Минск : УП «ИВЦ Минфина», 2022. – С. 375–376.

*Поступила 13.02.2023*

**УДК 621.793**

**Девойно О. Г., Рудницкий А. Ю., Володько А. С., Вегера И. И.**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ГАЗОПЛАМЕННЫМ  
НАПЫЛЕНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ИНДУКЦИОННЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ В  
РЕЖИМЕ ЗАКАЛКИ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*В статье описана возможность использования метода оплавления с помощью ТВЧ с одновременной закалкой из жидкого состояния никелевых самофлюсующихся сплавов. В статье исследовались макрогеометрия поверхности, а также влияние режимов на трещинообразование в полученном покрытии и твердость поверхности. В работе приводится информация о влиянии режимов индукционной обработки на трещинообразование и на физико-механические свойства. В работе показана возможность использования метода ТВЧ с одновременной закалкой омытием струями воды из расплавленного состояния для оплавления покрытий из никелевого сплава. В статье констатируется, что, управляя режимами оплавления, можно изменять физико-механические свойства.*

**Введение.** В настоящее время инженерия поверхности играет все более возрастающую роль в получении изделий с заданным уровнем поверхностных свойств [1]. Использование износостойких, коррозионностойких, жаростойких, химически стойких, электроизоляционных, теплоизоляционных и других видов покрытий позволяет резко сократить потери металлов, расход ресурсов на их возмещение и дает возможность повысить качество, надежность и долговечность машин и оборудования [2]. Это значительно сокращает себестоимость их обслуживания за счет снижения затрат на ремонтные работы, снижения количества запасных комплектующих, а также уменьшение простоя машин.

Вследствие чего обоснованно восстановление деталей и узлов с помощью методов газотермического напыления и оплавления.

Газотермическое напыление порошковых материалов представляет собой процесс образования на поверхности изделия покрытия из нагретых до плавления частиц распыляемого материала с использованием теплоты сжигания горючей смеси или теплоты дугового разряда в газовых средах [3].

Существующую технологию газотермического напыления в зависимости от применяемого источника тепловой энергии можно разделить на два основных вида: газопламенное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горючего газа с кислородом, и плазменное напыление, где источником нагрева частиц порошка служит плазменный факел, образующийся при пропускании плазмообразующего газа через зону горения электрической дуги [3]. При этом газопламенное напыление обеспечивает возможность нанесения покрытий, изготовленных из металлов и полимеров, а также имеет невысокую стоимость оборудования для напыления [4].

Для формирования газотермических покрытий используют широкую гамму порошков, выпускаемых специализированным предприятием, среди которых представляют интерес самофлюсующиеся порошки [5]. Наиболее широкое распространение получили сплавы на основе никеля, которые представляют собой многокомпонентную систему  $Ni-Cr-B-Si-C$ . Данный порошок обеспечивает высокую износостойкость и коррозионную стойкость сплава, относительно небольшую температуру плавления сплава за счет образования в сплаве при оплавлении сложной легкоплавкой эвтектики системы  $Ni-B-Si$ , преимущественно  $\gamma + Ni + Ni_3B$  [5]. Никелевые сплавы за счет своего химического состава после напыления предполагают операцию оплавления.

Наиболее распространенными методами оплавления являются: оплавление газопламенной горелкой, лазерное оплавление, оплавление в печи и высокочастотный индукционный нагрев, однако многие из них требуют охлаждения вместе с деталью. Так, при оплавлении газопламенной горелкой или в печи необходим объемный нагрев детали. Некоторые методы позволяют оплавливать детали без объемного нагрева. К таким методам можно отнести методы лазерной обработки и оплавления с помощью ТВЧ, при этом последний обеспечивает высокую производительность.

Никелевые сплавы являются структурно-чувствительными из-за чего режимы оплавления сильно влияют на их свойства. Например, лазерная обработка, где обеспечиваются высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к повышению стойкости в 2–3 раза. Однако, несмотря на перспективность такого метода, он обладает важным недостатком в виде низкой производительности. Оплавление с помощью ТВЧ, в свою очередь, в известных работах предполагает низкие скорости охлаждения.

С учетом сказанного, целью исследования была выбрана разработка технологии получения защитных покрытий газотермическим напылением с последующим оплавлением ТВЧ в режиме закалки из жидкого состояния.

**Оборудование и методики проведения исследования.** Для исследования использовали цилиндрические образцы из стали 40Х диаметром 26 миллиметров и длиной 120 миллиметров.

Поверхность подготавливали дробеструйной обработкой. Данный метод является наиболее эффективным и производительным, обеспечивающим как очистку поверхности от адсорбированных масляных и оксидных пленок, так и активацию основы вследствие интенсивного перенаклепа. Применялись следующие режимы дробеструйной обработки: давление воздуха 0,6 МПа, диаметр сопла 8 мм, дистанция 40–50 мм. В качестве абразивного материала использовалась чугунная колотая дробь ДЧК-1,8 ГОСТ 11964-81 со средним размером частиц 1,8 мм.

Газопламенное напыление производили на установке ТРУ-БПИ. В качестве горючего газа использовали смесь МАФ и кислорода, в качестве транспортирующего – воздух. Давление МАФ составило – 0,12 МПа, давление кислорода (ГОСТ 5583-79) – 0,4 МПа, давление воздуха 0,18 м<sup>3</sup>/ч, дистанция напыления – 170 мм, производительность горелки – 6 кг/ч.

На все прутки было нанесено покрытие толщиной 1,5 мм на диаметр. Материал порошка ПР-НХ17СП4 с грануляцией от 40 до 100 микрон. В состав данного порошка входят: 74,3 % никеля, 1 % углерода, 17 % хрома, 4,1 % кремния, 3,6 % бора. Твердость покрытия по HRC 55–60.

Оплавление покрытия производили на установке индукционного нагрева, при частоте поля – 53 кГц, диаметре индуктора – 40 мм. Резкое охлаждение оплавленной зоны на данном этапе исследования производилось омыванием ее струями воды с помощью отверстий в охлаждающем устройстве под углом в 45° (рис. 1).

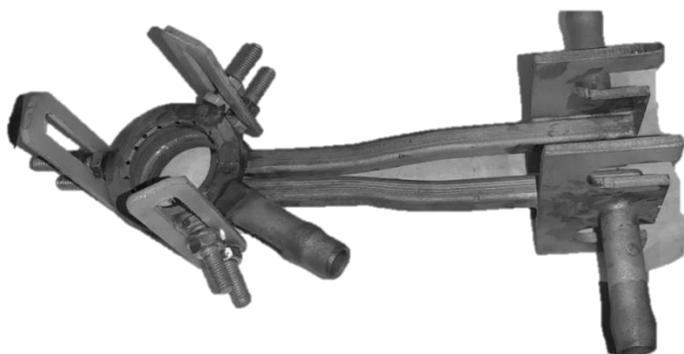


Рис. 1. Индуктор для установки индукционного нагрева

На рис. 2 показан принцип действия оплавления ТВЧ в режиме закалки.

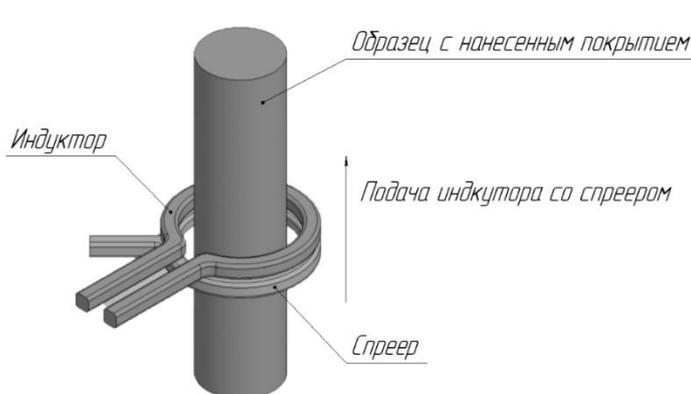


Рис. 2. Принцип действия оплавления ТВЧ в режиме закалки

В качестве варьируемых параметров использовали скорость перемещения (от 1,5 до 4,5 мм/сек), частоту вращения (от 6 до 75 Гц), мощность индуктора (от 80 до 100 кВт), выдержка перед началом перемещения индуктора (от 2 до 5 сек) и зазор между индуктором и охлаждающим устройством (от 4 до 7 мм).

Исследование проводилось в два этапа. На первоначальном этапе использовались режимы оплавления образцов, указанные в табл. 1, а также спреер имел отверстия, перпендикулярные к оси вращения образцов (рис. 3, а). На текущем этапе использовались режимы, указанные в табл. 2, а также спреер с отверстиями под углом в 45° (рис. 3, б).

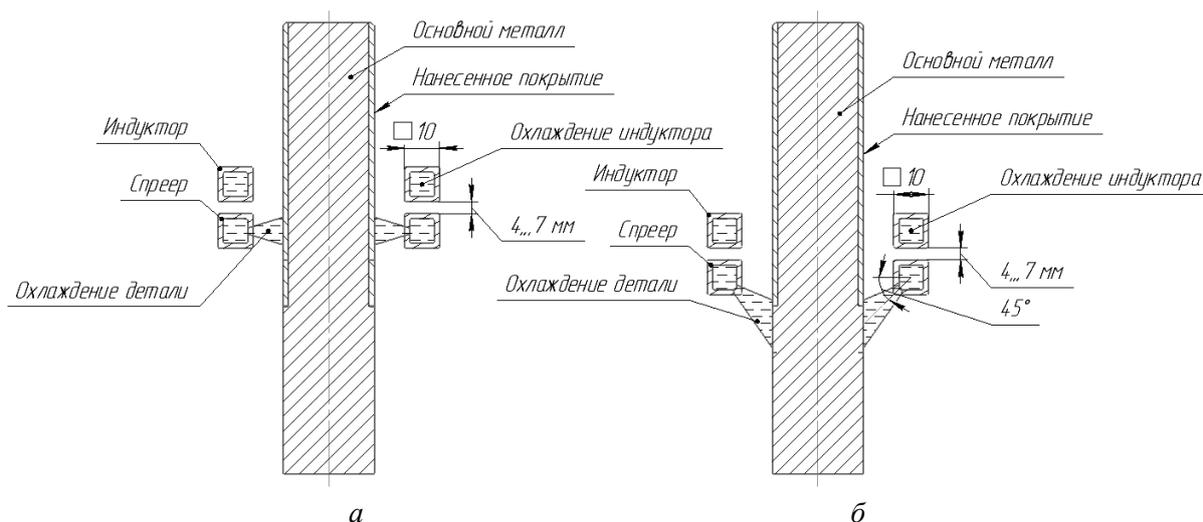


Рис. 3. Конструкция индукторов:  
*a* – на первоначальном этапе исследования; *б* – на текущем этапе исследования

Таблица 1 – Условия оплавления образцов на первом этапе

Номер образца	Мощность, кВт	Скорость подачи, мм/сек	Частота вращения, Гц
1	100	2	10
2	100	2	50
3	100	от 1,5 до 2	25
4	100	2	10
5	95	2	6
6	85	1,85	10
7	90	1,5	6
8	95	1,5	6

Таблица 2 – Условия оплавления образцов на данном этапе исследования

Номер образца	Мощность, кВт	Скорость подачи, мм/сек	Частота вращения, Гц	Выдержка, сек	Зазор, мм
1	80	2,5	25	4	4
2	80	2	25	4	4
3	80	1,5	25	4	4
4	80	2,5	25	5	4
5	100	2,5	25	2	4
6	100	3	25	2	4
7	100	3,5	25	2	4
8	100	2,5	50	2	4
9	100	2,5	75	2	4
10	80	1,5–2,5	25	4	7
11	80	3	25	4	7
15	90	4	25	4	7

Для изучения твердости покрытий подготовили шлифы. Они изготавливались в виде поперечного среза. В нашем случае покрытия были средней толщины.

Процесс подготовки металлографических шлифов состоял из следующих этапов: резка, запрессовка, механическая подготовка (шлифование).

Оценивались следующие параметры получаемых покрытий:

- наличие трещин, морфология поверхности – визуально;
- микротвердость покрытий с использованием микротвердомера ПМТ-3.

Исследования микротвердости проведены на приборе ПМТ-3 путем вдавливания в испытуемый образец четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$  при нагрузке 50 г (0,49 Н) ГОСТ 9450–76.

**Результаты исследования.**

**Исследование морфологии поверхности.** На рис. 4 изображен общий вид образцов после оплавления на первоначальном этапе исследования и, соответственно, на рис. 5 изображен общий вид образцов на текущем этапе.



Рис. 4. Общий вид образцов после оплавления на первоначальном этапе



Рис. 5. Общий вид образцов после оплавления на текущем этапе

В ходе исследования морфологии выявлено, что после оплавления покрытия методом ТВЧ, с одновременной его закалкой в исследованном диапазоне режимов обработки, трещин в покрытии не обнаружено, что подтверждает предположение о возможности закалики из расплава. Это связано со спецификой нагрева в условиях ТВЧ, вследствие того, что порошки не ферромагнитные, а токи ТВЧ возбуждаются на поверхности основного металла и плавление покрытия происходит, преимущественно, по механизму кондуктивной теплопередачи. В итоге происходит выравнивание температуры стальной детали и покрытия, что предотвращает трещинообразование. Анализ морфологии покрытия после оплавления показал, что возникает достаточно однородные по шероховатости и морфологии поверхности. Следует заметить, что на первоначальном этапе исследований (рис. 4)

имел место развитый микрорельеф поверхности, а также эффект рваной резьбы. Это связано с тем, что омывание образца производился под прямым углом к образцу (рис. 3, а). В следствие чего под механическим воздействием струи воды произошло формирование развитого микрорельефа поверхности. На текущем этапе работы при обработке деталей использовался спреер доработанного вида (рис. 3, б), по сравнению с предыдущей конструкцией. В данном спреере отверстия расположены под углом 45 градусов, что привело к значительному уменьшению механического воздействия на зону расплава (рис. 5).

**Исследование микротвердости покрытия.** Результаты испытаний на микротвердость исследуемых образцов покрытий, полученных на данном этапе исследования, представлены ниже в виде графиков (рис. 6, 7), где значения по оси X – глубина измерения (мм), а по оси Y – твердость материала (МПа).

При исследовании твердости с помощью микротвердомера (рис. 6, 7), было выявлено, что режимы индукционного оплавления существенно влияют на получаемую твердость покрытия, средняя твердость покрытия варьируется от 4870 до 7930 Мпа (рис. 8).

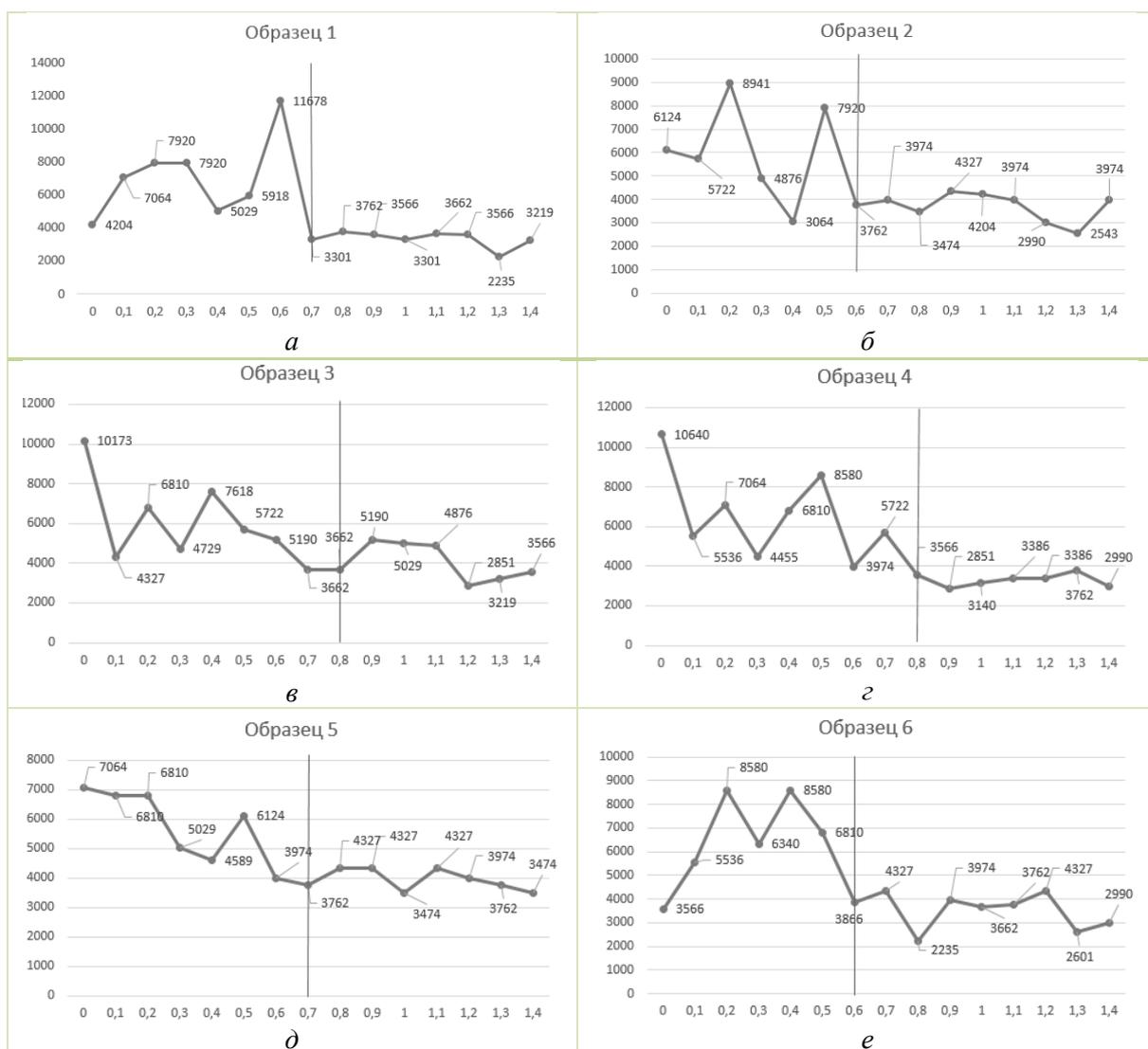


Рис. 6. Графики изменения твердости по глубине:  
а – е – режимы 1–6

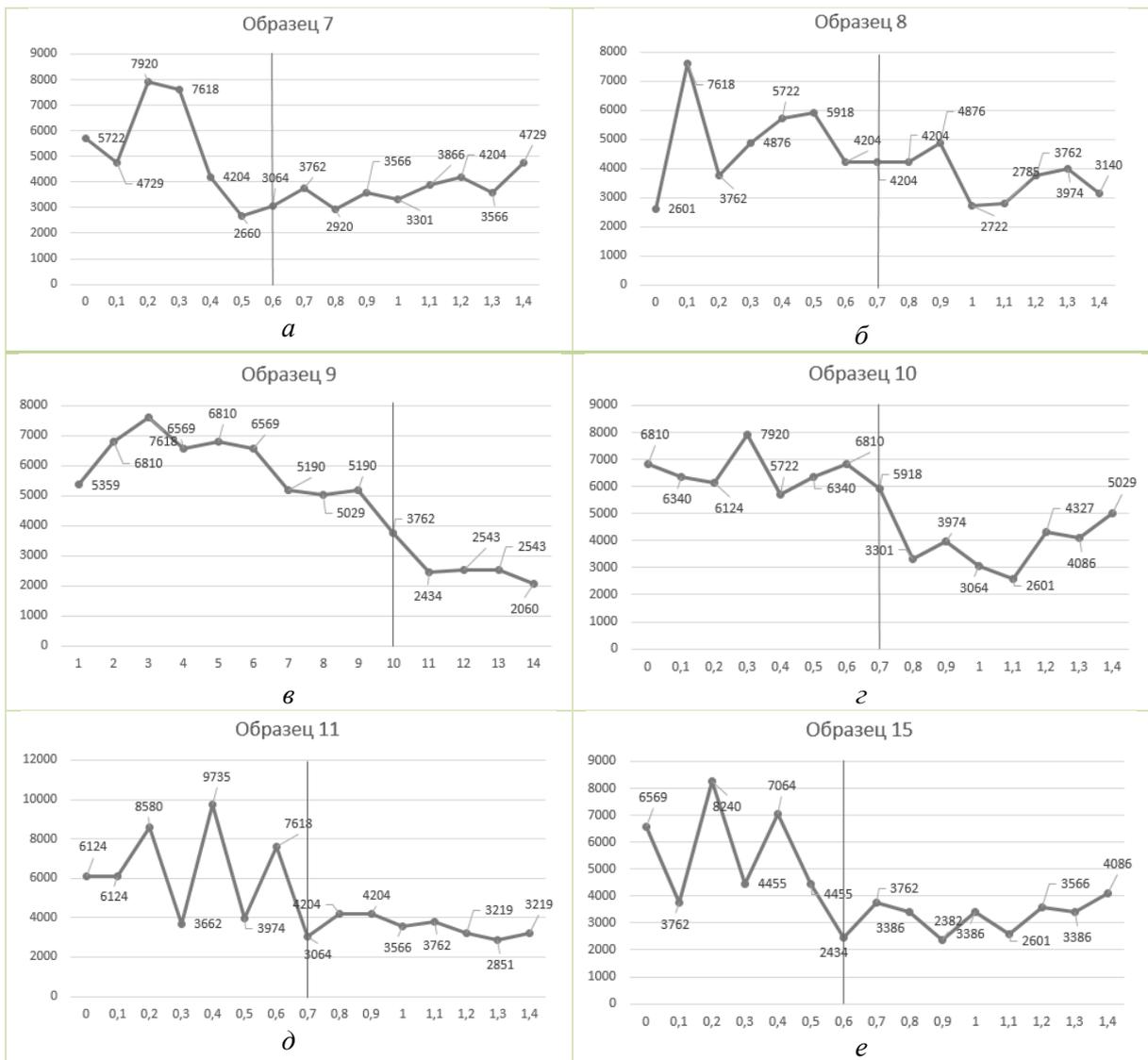


Рис. 7. Графики изменения твердости по глубине:  
*a – e* – режимы 7–11 и 15 соответственно

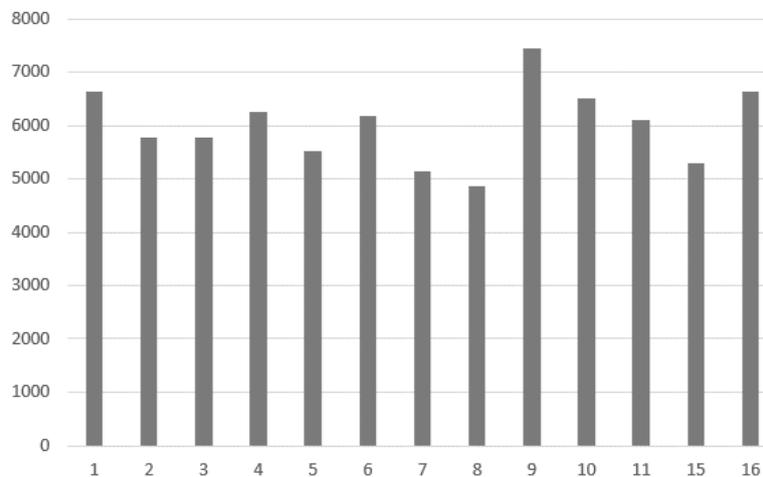


Рис. 8. Диаграмма средней микротвердости покрытий образцов

При анализе полученных данных (рис. 6, 7) было установлено, что имеется существенная зависимость распределения твердости от режимов ТВЧ-оплавления, с достаточно сложным характером. Это связано с тем, что разогревание образцов происходит на поверхностном слое основного материала. Так на режимах *в* (рис. 6) и *а* (рис. 7) видно, что практически нет изменения микротвердости на границе перехода от основного материала к материалу покрытия. Это свидетельствует о том, что при таких режимах шло интенсивное их перемешивание по всей глубине расплава. На режимах *з*, *д*, *е* (рис. 6) и *б*, *в*, *е* (рис. 7) произошло частичное перемешивание материала покрытия с основой, при этом на поверхности образца сохранились свойства нанесенного самофлюсующегося сплава. На режимах *а*, *б* (рис. 6) и *з* (рис. 7) перемешивание практически не произошло. Исходя из этого можно считать, что их можно считать оптимальными вариантами, так как режимы не приводят к перемешиванию материала покрытия с материалом заготовки и достигается высокая средняя по оплавленному слою твердость – 5770–6630 Мпа.

#### **Выводы.**

1. Доказана возможность оплавления износостойких покрытий с помощью индукционного нагрева с одновременной закалкой из жидкого металлического состояния без разрушения их целостности.

2. За счет закалки достигается удовлетворительное качество поверхности, причиной чего является влияние направленного водяного охлаждения струями жидкости под углом в 45° в сторону от индуктора, что значительно уменьшает гидродинамическое воздействие на зону расплава металла.

3. Исследование микротвердости показало, что режимы индукционного оплавления существенно влияют на получаемую твердость покрытия.

4. При различных режимах оплавления происходит как полное термодиффузионное перемешивание материала покрытия с основой, так и частичное их перемешивания, что дает возможность управлять свойствами получаемых покрытий.

5. Наиболее оптимальным режимом в исследованном диапазоне режимных параметров является режим с мощностью индуктора 80 кВт, частотой вращения детали 25 Гц, скоростью перемещения индуктора в диапазоне от 2 до 3 мм/сек, зазором между индуктором и охлаждающим устройством не более чем 4 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воздействие токов высокой частоты на структуру напыленных никелевых покрытий / Е. А. Зверев, В. Ю. Скиба, Т. Г. Мартынова, Н. В. Вахрушев // Технология машиностроения и материаловедение. – 2018. – № 2. – С. 84–87.

2. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О. Г. Девойно [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – 280 с.

3. Ивашко В. С. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий / В. С. Ивашко, И. Л. Куприянов, А. И. Шевцов. – Мн.: Навука і тэхнік, 1996. – 375 с. – ISBN 5-343-01583-2.

4. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп. Х12 В. Н. Попова; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с., ил.

5. Структура и свойства износостойких покрытий: монография / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязь. – Мн.: БГАТУ, 2006. – 327 с.

*Поступила 02.12.2023*