

На правах рукописи



ДОЖДЕЛЕВ Алексей Михайлович

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО БИМЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ
СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ЗОНЫ СПЛАВЛЕНИЯ Р2М8 И 30ХГСА**

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственной технической университет» (ТвГТУ)

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Лаврентьев Алексей Юрьевич**,
доцент кафедры «Технология металлов и материаловедение» ФГБОУ ВО «ТвГТУ»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Чуканов Александр Николаевич**,
профессор кафедры «Технология и сервис» ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого» (г. Тула)

доктор технических наук, профессор **Колмыков Валерий Иванович**,
профессор кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет» (г. Тверь)

Защита состоится «19» апреля 2018г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан " " _____ 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.03
кандидат технических наук



Швецов О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие машиностроения тесно сопряжено с новыми технологиями, внедряемыми в инструментальное производство. Отечественные предприятия, особенно в период экономического кризиса, нестабильной геополитической ситуации и в условиях санкций со стороны ряда промышленно развитых стран остро нуждаются в качественном металлорежущем инструменте российского производства. Как отмечает Космынин А.В., более 65 % металлорежущего инструмента изготавливается из быстрорежущих сталей. Несмотря на то, что быстрорежущий инструмент известен уже более 100 лет, он актуален и востребован в производстве.

При изготовлении металлорежущего инструмента используются технологии наплавки, позволяющие получать биметаллические рабочие элементы. Данная технология позволяет сократить затраты на изготовление инструмента за счет использования менее дорогостоящей конструкционной стали в качестве материала корпуса инструмента.

В процессе наплавки в месте соединения наплавленной и конструкционной сталей можно выделить несколько характерных участков, отличающихся своей структурой и свойствами. Гнюсов С.Ф. отмечает, что сварной стык биметаллического наплавленного инструмента представляет собой участок с пониженными механическими свойствами. Их снижение обусловлено возникновением крупнозернистой структуры металла зоны термического влияния (ЗТВ) за счет перегрева. Также в металле ЗТВ имеет место значительный градиент по твердости, вызванный различиями в структуре разных участков ЗТВ. Снижение твердости металла корпуса биметаллического инструмента в ЗТВ не позволяет в полной мере реализовать преимущества технологии наплавки быстрорежущей стали. Под воздействием эксплуатационных нагрузок металл в зоне пониженной твердости деформируется, что приводит к нарушению геометрии инструмента или поломкам. Для исключения данной проблемы обычно увеличивают толщину и ширину наплавленного слоя. В результате существенно увеличиваются затраты материалов и энергии при производстве биметаллического инструмента.

Повысить твердость наплавленного металла и металла ЗТВ возможно за счет регулирования термического цикла наплавки и последующей термомеханической обработки. Для этого требуется обеспечить увеличение скорости нагрева и охлаждения биметалла в процессе его формирования, а также сократить протяженность участков ЗТВ и высоту наплавленного слоя, что позволит повысить твердость и быстрорежущей стали, и металла участков ЗТВ за счет проведения поверхностного пластического деформирования (ППД) напрямую через наплавленный слой.

Таким образом, обоснование и разработка метода совершенствования структуры наплавленного инструментального биметалла является важной и актуальной задачей материаловедения.

Целью работы является обоснование и разработка способа изготовления наплавленного инструментального биметалла с повышенной надежностью на основе исследований влияния термического цикла наплавки и термомеханических воздействий на структуру наплавленного металла и металла зоны термического влияния.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ условий работы и повреждений биметаллических инструментов с рабочим слоем, наплавленным быстрорежущей сталью.

2. Исследовать влияние термического цикла наплавки инструментального биметалла на структуру наплавленного металла и металла ЗТВ.

3. Теоретически и экспериментально обосновать способ управления структурой инструментального биметалла посредством регулирования термического цикла наплавки.

4. Теоретически и экспериментально обосновать возможность применения ППД в температурном интервале полиморфных превращений на стадии охлаждения наплавленной быстрорежущей стали для упрочнения наплавленного слоя и металла ЗТВ.

5. На основе выполненных исследований научно обосновать новую технологию изготовления биметаллического инструмента, изготовить экспериментальную партию и провести производственные испытания.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Выявлен характер изменения структуры зоны сплавления быстрорежущей стали Р2М8 и конструкционной стали 30ХГСА инструментального биметалла в процессе нагрева при типовой технологии электродуговой наплавки быстрорежущей стали на предварительно закаленную и отпущенную конструкционную сталь. Установлено, что снижение твердости конструкционной стали в ЗТВ происходит в участке перегрева за счет образования ферритной составляющей в структуре металла.

2. Предложена технология, позволяющая воздействовать на структуру наплавленной быстрорежущей и конструкционной сталей посредством ППД, отличающаяся тем, что ударное воздействие на металл ЗТВ осуществляется напрямую через наплавленный слой. Возможность осуществления данного процесса обеспечивается за счет уменьшения толщины наплавленного слоя Р2М8 (≤ 2 мм) и сокращения протяженности ЗТВ (≤ 3 мм).

3. Предложен способ управления структурой металла ЗТВ посредством регулирования термического цикла наплавки. Определена минимальная допустимая скорость охлаждения биметалла Р2М8 / 30ХГСА, составляющая ~ 14 °С/с и обеспечивающая формирование слоя быстрорежущей стали с большим количеством легирующих элементов в твердом растворе при одновременном исключении образования ферритной составляющей в участке перегрева ЗТВ конструкционной стали.

4. Показана возможность управления структурой биметалла Р2М8 / 30ХГСА, полученного методом электродуговой наплавки, за счет ударного

воздействия, отличающаяся от существующих методов тем, что ППД выполняли в интервале температур 350...200 °С. В наплавленном слое обеспечивали формирование структуры мартенсит + карбиды (содержание остаточного аустенита не более 4%), при этом обеспечили повышение твердости металла ЗТВ при одновременном исключении образования трещин.

Практическая значимость результатов работы:

Разработана технология изготовления инструментального биметалла, основанная на регулировании термического цикла наплавки и термомеханических воздействиях, обеспечивающая повышение эксплуатационных характеристик инструментального материала. Технология позволяет получить наплавленный металл Р2М8 с твердостью около 870 HV_{0,2}, а также повысить твердость конструкционной стали 30ХГСА в ЗТВ до 370 HV_{0,2} при уменьшении протяженности ЗТВ до 2-х раз по сравнению с типовой технологией изготовления инструментального биметалла. Подтверждена возможность уменьшения толщины наплавленного слоя (≤ 2 мм) в биметаллическом инструментальном материале без снижения эксплуатационных характеристик. Глубина упрочнения составила 4,5 мм, при слое наплавленного металла толщиной 1,7 мм. Способ защищен патентом RU 2627837 C1.

Технология обеспечивает работоспособность инструмента в производственных условиях. Инструмент, изготовленный по разработанной технологии, прошел успешные испытания на ОАО «Центросвармаш» (г. Тверь).

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе по дисциплинам «Материаловедение», «Технологические процессы в машиностроении» и «Технология конструкционных материалов» при подготовке бакалавров по техническим направлениям в Тверском государственном техническом университете.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации.

Достоверность результатов обеспечена применением стандартных и современных методов металлографических исследований, апробированных методов механических испытаний, а также большим объемом экспериментального материала с использованием статистической обработки результатов измерений. Научные положения и выводы по работе имеют теоретическое обоснование и не противоречат известным научным представлениям и результатам. Достоверность результатов исследований и выводов подтверждена результатами производственных испытаний.

Личный вклад автора. Автором теоретически обоснован, экспериментально подтвержден и практически реализован новый способ изготовления наплавленного биметаллического инструмента. Автор участвовал в планировании и постановке экспериментов, обработке и анализе полученных результатов. Выполнял термическую обработку, наплавку и ППД образцов, количественный и качественный металлографический анализ микроструктуры, исследовал механические свойства биметалла. Автором предложена для

внедрения в производство технология изготовления насадного зенкера с наплавленной режущей частью.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ условий работы и повреждений биметаллических инструментов с рабочим слоем, наплавленным быстрорежущей сталью. Результаты исследований влияния технологических параметров процесса изготовления инструментального биметалла на структуру наплавленного металла и металла ЗТВ.

2. Теоретическое и экспериментальное обоснование способа управления структурой инструментального биметалла посредством регулирования термического цикла наплавки.

3. Теоретическое и экспериментальное обоснование способа применения ППД в температурном интервале протекания полиморфных превращений на стадии охлаждения наплавленной быстрорежущей стали для упрочнения и повышения твердости наплавленного слоя и металла ЗТВ. Способ защищен патентом RU 2627837 C1.

4. Научно-обоснованные практические рекомендации по технологии изготовления наплавленного инструментального биметалла.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на научно-технической конференции студентов и аспирантов машиностроительного факультета «Проблемы машиностроения-2013» (Тверь, 2013 г.); на Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2014 г.); на 16-й. Международной научно практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (Санкт-Петербург, 2014 г.); на XII Международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (Орел, 2014 г.); на 34-й Всероссийской конференции «Наука и технология», посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева (Москва, 2014 г.); на Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2014 г.), «European Science and Technology: materials of the VIII international research and practice conference» (Мюнхен, 2014 г.).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 24 научных работы, в том числе 5 в научных журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ, а также один патент.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и общих выводов. Общий объем работы составляет 177 страниц машинописного текста, включая 91 рисунок и 6 таблиц. Список литературы содержит 178 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы, о личном вкладе соискателя, структуре и объеме работы.

В первой главе проведен анализ опубликованных научных данных в области изготовления инструментального биметалла, наплавки быстрорежущей стали, условий возникновения различных участков ЗТВ, а также методов воздействия на структуру металла в этих участках.

Слой металла ЗТВ, на котором находится наплавленный инструментальный материал, может стать причиной выхода из строя инструмента. Это связано с охрупчиванием металла ЗТВ в участке перегрева и в участке отпуска. Снижение твердости металла ЗТВ может привести к смещению режущей части инструмента под воздействием эксплуатационных нагрузок, что может стать причиной поломки инструмента (биметаллические наплавленные резцы, штампы и пр.)

Эффективным способом воздействия на структуру металла ЗТВ является регулирование термического цикла наплавки и последующее термомеханическое воздействие на биметалл. В результате удается существенно повысить эксплуатационные характеристики инструментального биметалла.

Во второй главе описаны исследования характера изменений структуры наплавленной быстрорежущей стали и конструкционной стали ЗТВ под воздействием нагрева в процессе электродуговой наплавки.

Полосы конструкционной стали 30ХГСА размерами 100×25×5мм подвергали закалке (нагрев до 880 °С, выдержка и охлаждение в масле) и отпуска (нагрев до 200 °С, выдержка и охлаждение на спокойном воздухе). Затем выполняли наплавку слоя быстрорежущей стали Р2М8 при помощи сварочного полуавтомата Fronius TransPuls Synergic 3200 СМТ+. В качестве защитного газа использовали аргон. Величина погонной энергии, затраченной на наплавку, составила 2,75...3 кДж/см. Выбранными режимами обеспечивали формирование наплавленного валика с равномерным сечением. Дальнейшее понижение погонной энергии приводило к нарушению формирования валика.

Структура и твердость отдельных участков биметалла приведены на рис. 1. Исследование структурно-фазового состава биметалла проводили при помощи оптического микроскопа МИМ-8 и растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV. Микротвёрдость определяли с помощью прибора ПМТ-3 с использованием алмазной пирамидки с углом при вершине 136° по ГОСТ 9450-76. Твердость 30ХГСА, не подвергшейся термическому воздействию, ~ 400 HV_{0,2}, твердость металла в участке перегрева ~ 300 HV_{0,2}, в участке отпуска ~ 360 HV_{0,2}. Такое снижение твердости металла ЗТВ, на котором расположен слой наплавленной быстрорежущей стали, снижает надежность инструментального биметалла.

Для увеличения эксплуатационных характеристик биметалла необходимо получить структуру мартенсита в наплавленном металле и в участке перегрева ЗТВ, а на более глубоких участках ЗТВ снизить содержание сорбита. Это возможно за счет регулирования термического цикла наплавки. Осуществлять его можно за счет уменьшения величины тепловложения при наплавке, что обеспечит увеличение скорости охлаждения наплавленного металла и металла околошовной зоны, а также сокращение протяженности участков ЗТВ. При этом сокращается и время пребывания наплавленного металла и металла околошовной зоны в интервалах критических температур (A_1 – A_3).

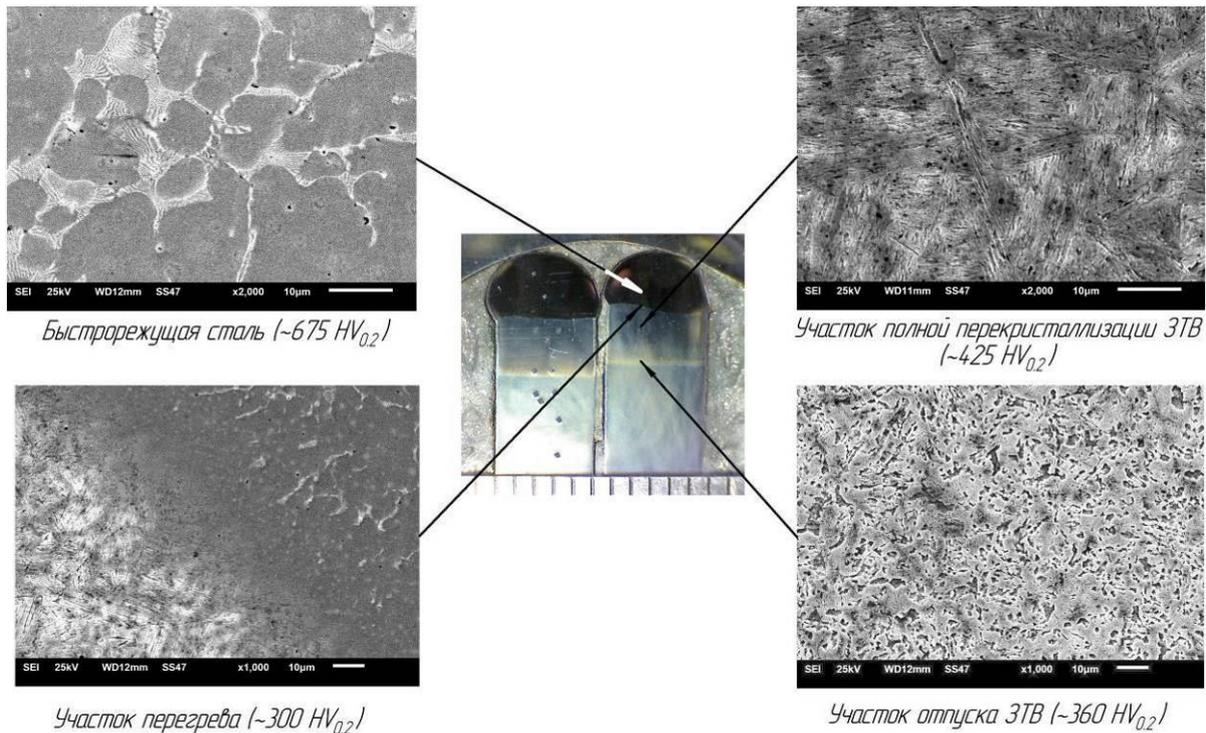


Рис. 1. Структура биметалла в различных участках

Минимальная скорость охлаждения ($\omega_{охл}$) биметаллической заготовки в участке перегрева ЗТВ, при которой в структуре конструкционной стали присутствует максимальное количество мартенсита ($M \approx 90\%$), была определена по методике Макарова Э. Л. (1) и составила ~ 14 °C/с.

$$\omega_{охл} = \sqrt[n_M]{-\frac{\ln\left(0,9 - \frac{M}{100}\right)}{k_M}}; \quad n_M = \frac{3,3475}{\ln(\omega_{M2} / \omega_{M1})}; \quad k_M = \frac{0,1054}{\omega_{M1}^{n_M}}; \quad (1)$$

где n_M, k_M – расчетные коэффициенты, ω_{M1} и ω_{M2} – расчетные скорости охлаждения конструкционной стали, соответствующие 90 и 5% мартенсита.

Такое же значение минимальной скорости охлаждения было получено на основе анализа диаграммы превращения аустенита в стали 30ХГСА при непрерывном охлаждении, приведенной в работе Попова А.А. (см. рис. 2). Охлаждение биметаллической заготовки со скоростью выше ~ 14 °C/с позволяет получить структуру мартенсита и бейнита в металле участка

перегрева ЗТВ с исключением образования в нем феррита. Наплавка на постоянном токе не позволяет достигнуть такой скорости охлаждения (см. рис. 2). Термический цикл наплавки строили на основании значений, полученных инфракрасным термометром ТИ-215.

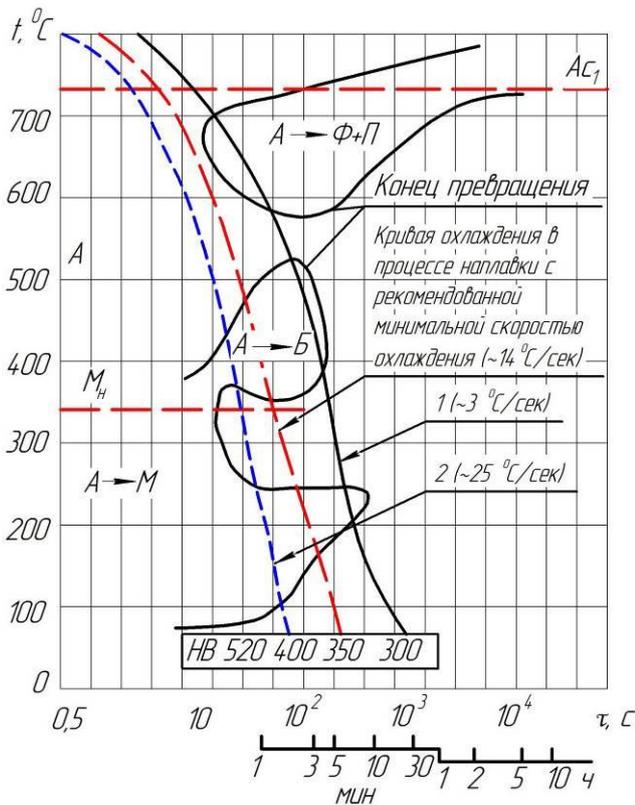


Рис. 2. Диаграмма превращения аустенита в стали 30ХГСА при непрерывном охлаждении с кривыми охлаждения в процессе наплавки [по Попову]:

- 1 – наплавка на постоянном токе;
- 2 – наплавка с двойным управлением

характеристик инструментального биметалла.

В третьей главе исследованы изменения структуры наплавленного металла и металла ЗТВ при регулировании термического цикла наплавки.

Увеличение скорости охлаждения металла корпуса инструмента возможно за счет уменьшения величины тепловложения при условии качественного формирования наплавленного валика. За счет использования технологии наплавки с двойным управлением процессом переноса электродного металла в дуге удалось существенно увеличить скорость охлаждения биметалла и превысить расчетную скорость $\omega_{охл} = 14 \text{ } ^\circ\text{C/с}$ (см. рис. 2). Также сократили величину погонной энергии при наплавке валиков в 1,5...2 раза по сравнению с наплавкой на постоянном токе (величина погонной энергии составила 1,75...2 кДж/см). В результате получили слой наплавленного металла толщиной 2 мм, что позволяет воздействовать на металл ЗТВ благодаря ППД непосредственно через наплавленный слой.

Повысить твердость наплавленного металла и металла ЗТВ возможно за счет использования ППД. В процессе наплавки на стадии охлаждения в интервале температур $\gamma \rightarrow \alpha$ ППД позволяет устранить в быстрорежущей стали остаточный аустенит, переведя его в мартенсит деформации. Также при помощи ППД возможно повысить твердость металла ЗТВ за счет наклепа. Однако минимальная толщина наплавленного металла, которую возможно получить при использовании наиболее распространенной схемы наплавки на постоянном токе ($\geq 4 \text{ мм}$), не позволяет воздействовать на структуру и свойства металла ЗТВ напрямую через наплавленный слой. Следовательно, для устранения снижения твердости в участках ЗТВ биметаллического соединения посредством ППД требуется наплавлять минимально возможный слой быстрорежущей стали без снижения эксплуатационных

Применение наплавки с двойным управлением с совмещенной закалкой в процессе охлаждения из жидкой фазы обеспечивает формирование в наплавленном металле структуры остаточного аустенита, мартенсита и карбидов. Установили увеличение твердости наплавленного металла P2M8 с 615 HV_{0,2} до 651 HV_{0,2} за счет сохранения в твердом растворе большего количества легирующих элементов. Структурно-фазовый состав наплавленного металла представлен аустенитно-мартенситной матрицей с сеткой первичных карбидов типа M₆C «скелетно-реберной» морфологии. Первичные эвтектические карбиды расположены по границам зерен, в то время как дисперсные вторичные карбиды расположены в теле зерен матрицы. Исследования химического состава участков структуры P2M8 проводились при помощи энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA Energy350 X-Max 20 (см. рис. 3). Результаты исследований приведены в таблицах 1 и 2.

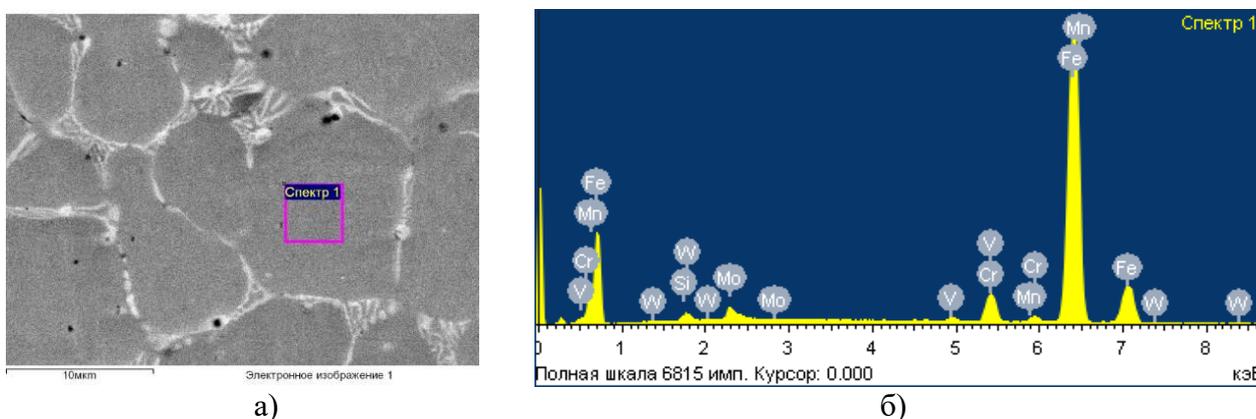


Рис. 3. Анализ химического состава участков структуры быстрорежущей стали:
а) анализируемый участок; б) результаты анализа

Таблица 1

Химический состав P2M8, наплавленной на постоянном токе

Исследуемый участок структуры	V	Cr	Mo	W	Fe
Твердый раствор	0,58	3,75	4,21	1,80	89,4
Сетка первичных карбидов	2,20	6,77	19,74	5,37	65,92

Таблица 2

Химический состав P2M8, наплавленной с двойным управлением

Исследуемый участок структуры	V	Cr	Mo	W	Fe
Твердый раствор	0,72	5,15	3,84	1,13	87,96
Сетка первичных карбидов	4,48	9,41	25,6	6,46	53,48

Установлено незначительное уменьшение количества карбидной эвтектики с 7,1 % до 6,6 %. Средняя толщина карбидной сетки образца, наплавленного на постоянном токе, имеет толщину 1,067 мкм, а карбидная сетка образца, наплавленного с двойным управлением, 0,662 мкм (см. рис. 4). Важным преимуществом ускоренного охлаждения наплавленного металла является образование структуры быстрорежущей стали с большим номером зерна – 10 (ГОСТ 5639-82) (рис. 4 б). Структура металла образца, наплавленного по типовой технологии наплавки, характеризуется 9-м номером зерна (рис. 4 а).

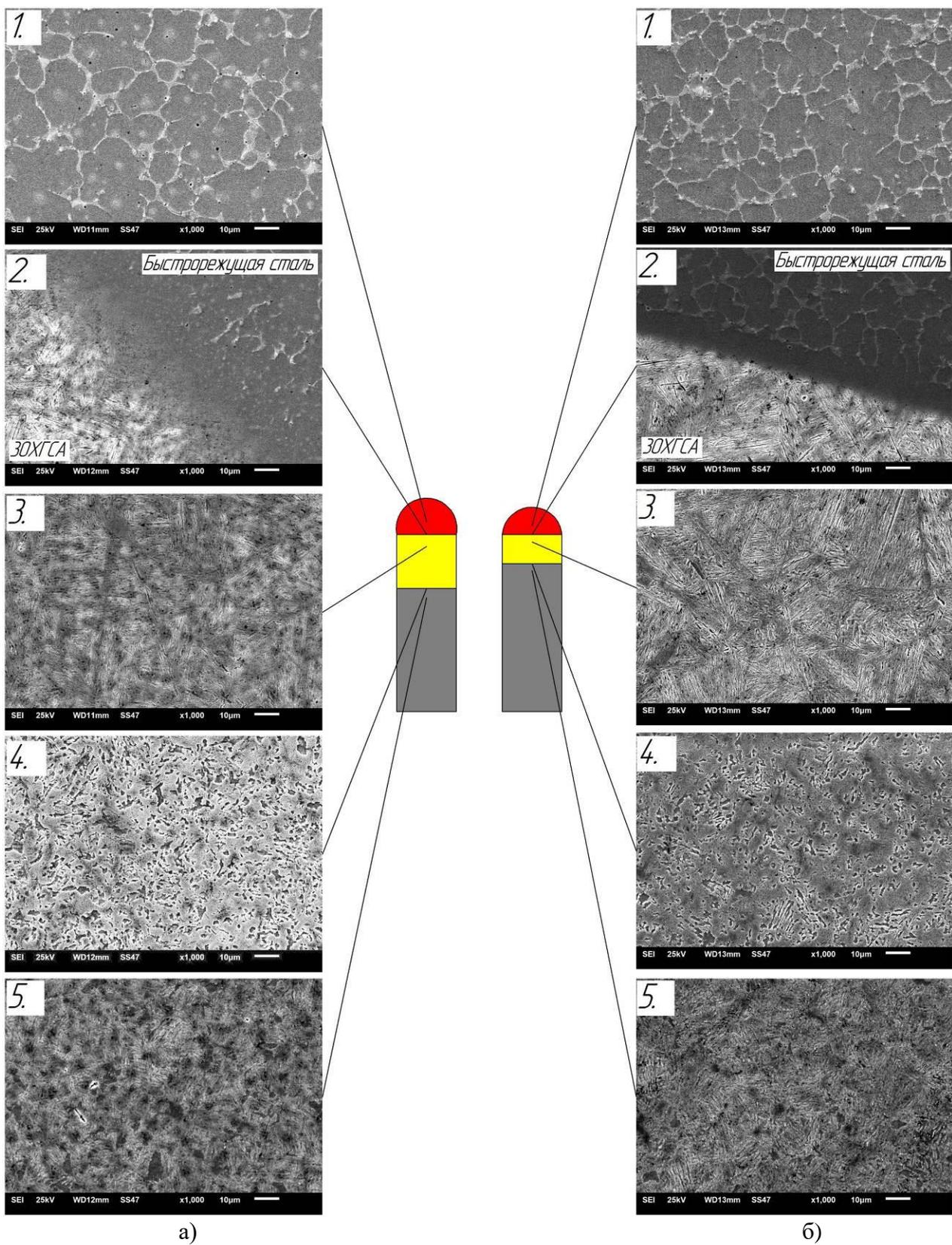


Рис. 4. Микроструктура биметаллических образцов, наплавленных:
 а) на постоянном токе; б) с двойным управлением;
 1) наплавленный металл; 2) участок перегрева; 3) участок полной перекристаллизации;
 4) начало участка отпуска; 5) участок отпуска

В участке перегрева в процессе наплавки происходит взаимное перемешивание наплавляемого и основного металлов. При наплавке на постоянном токе вблизи границы сплавления образуется слой наплавленного металла толщиной ~ 35 мкм (рис. 4 а), в котором присутствует доля конструкционной стали, а эвтектическая сетка карбидов отсутствует. Увеличение скорости охлаждения биметалла в процессе наплавки приводит к уменьшению толщины этого слоя до ~ 10 мкм (рис. 4 б). На более глубокой области участка перегрева структура образца, наплавленного с двойным управлением, представлена мартенситом, в то время как у образца, наплавленного на постоянном токе, в данном участке металл представлен мартенситом и ферритом.

Благодаря использованию наплавки с двойным управлением в участке полной перекристаллизации ЗТВ получили зерно мартенсита с уменьшенной в 2 раза длиной игл за счет увеличения скорости нагрева и охлаждения. В околошовной зоне происходит образование мелкозернистого аустенита из мартенсита. Возможность протекания процесса обеспечивается высокой скоростью охлаждения биметалла в процессе формирования наплавленного слоя, что исключает укрупнение зерна аустенита. Впоследствии из аустенита, при охлаждении со скоростью выше критической образуется мартенсит с более дисперсной структурой. В участке отпуска ЗТВ при ускоренном охлаждении биметалла снижается содержание сорбита.

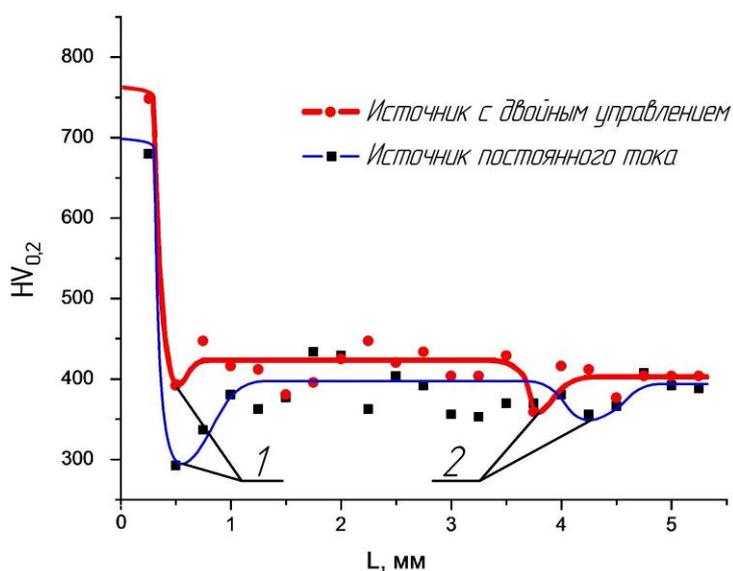


Рис. 5. График распределение микротвердости в биметалле при использовании различных схем переноса металла

Установлено, что снижение твердости 30ХГСА в ЗТВ происходит в двух областях (рис. 5). У образца биметалла, наплавленного на постоянном токе, протяженность области №1 (участок перегрева) составляет около 1,0 мм, при этом в ней выявлено наибольшее снижение твердости металла с 400 HV_{0,2} до 290 HV_{0,2} за счет образования ферритной составляющей. Область №2 наблюдается на расстоянии около 4,0 мм от участка сплавления, при этом

наибольшее снижение твердость металла до 350 HV_{0,2} происходит в начале участка отпуска ЗТВ. Снижение твердости происходит за счет распада мартенсита и образования структуры сорбита отпуска. Таким образом, в процессе наплавки на постоянном токе в биметалле образуются участки, существенно снижающие эксплуатационные характеристики биметаллического инструмента.

При использовании наплавки с двойным управлением за счет регулирования термического цикла удалось сократить протяженность участка перегрева ЗТВ, в котором происходило значительное снижение твердости, с 1,0 мм до 0,5 мм по сравнению с наплавкой на постоянном токе. Удалось также повысить твердость металла на этом участке с 290 HV_{0,2} до 390 HV_{0,2}. Полностью устранить снижение твердости участков ЗТВ и повысить твердость наплавленного металла возможно за счет последующего термомеханического упрочнения биметалла.

В четвертой главе описаны исследования влияния упрочнения ППД на этапе охлаждения в процессе наплавки на структуру наплавленного металла и металла ЗТВ инструментального биметалла. В качестве способа проведения ППД была выбрана упрочняющая чеканка (рис. 6). Обработку осуществляли с энергией удара $Q = 8...9$ Дж цилиндрическим бойком. Установка для чеканки изготовлена на базе перфоратора Bosch GBH 7-46. Воздействие ППД на металл ЗТВ осуществляли через слой наплавленного металла на стадии охлаждения в процессе наплавки.

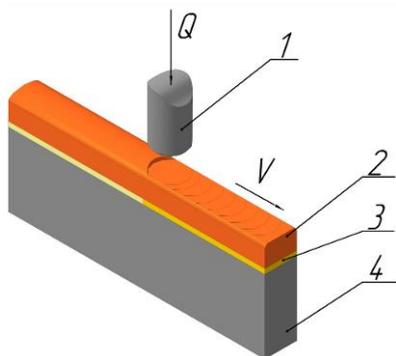
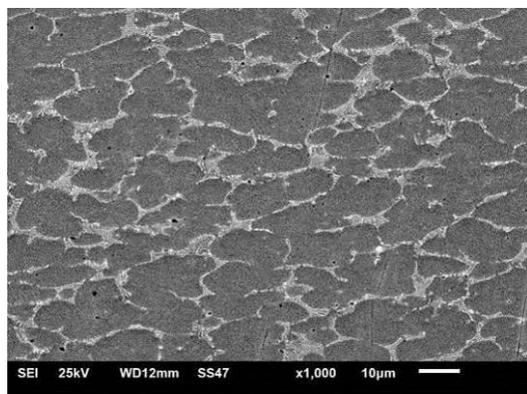


Рис. 6. Схема упрочняющей чеканки:

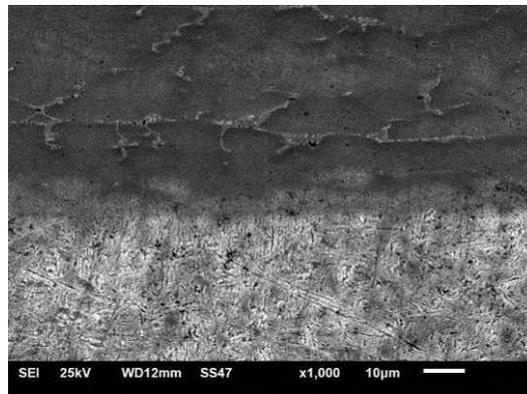
- 1 – бойк перфоратора;
- 2 – слой наплавленной быстрорежущей стали; 3 – ЗТВ;
- 4 – конструкционная сталь

ППД обеспечивает превращение остаточного аустенита наплавленного металла в мартенсит деформации, зерно наплавленного металла существенно деформируются (рис. 7 а). В результате обеспечивается повышение твердости

и износостойкости наплавленного слоя биметалла. Степень деформации зерна быстрорежущей стали согласно ГОСТ Р ИСО 643-2015 составила ~ 49%. В участке сплавления и участке закалки ЗТВ благодаря ППД происходит дополнительное измельчение структуры мартенсита (рис. 7 б). ППД также способствует релаксации внутренних напряжений биметалла, вызванных наплавкой. Температурный диапазон деформирования должен включать температуру начала мартенситного превращения для P2M8 ($M_n = 200$ °С).



а)



б)

Рис. 7. Микроструктура биметаллического образца после ППД в участке:
а) наплавленной быстрорежущей стали; б) сплавления

Для упрочнения ППД металла ЗТВ корпуса инструмента значения температур границ диапазона были получены расчетным методом по методике Макарова Э.Л. В расчетах учитывается химический состав исследуемой конструкционной стали, выявленный энергодисперсионным спектрометром. Установили, что для стали 30ХГСА температура начала мартенситного превращения составляет ~ 350 °С, температура конца мартенситного превращения ~ 125 °С. Ударное воздействие целесообразно прекратить при содержании мартенсита в структуре металла околошовной зоны на уровне ~ 50 %, которое наступает при охлаждении биметаллической заготовки до ~ 200 °С. Проведение ППД биметалла при дальнейшем снижении температуры увеличивает риск возникновения трещин в околошовной зоне.

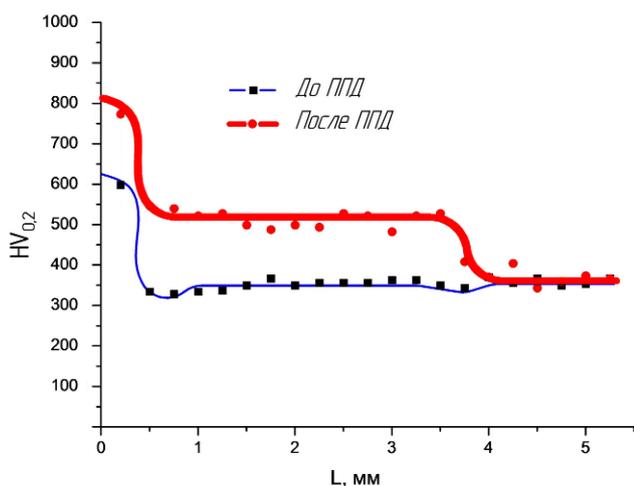


Рис. 8. График распределения микротвердости в биметалле после ППД

что снижает надежность инструмента. Разработанная технология термомеханического упрочнения биметаллического инструмента обеспечила получение биметалла с суммарным упрочненным слоем толщиной $h_{\Sigma}=4...5$ мм (рис. 9 б). В него входит слой наплавленной быстрорежущей стали $h=1,7...2$ мм и слой металла ЗТВ повышенной твердости.

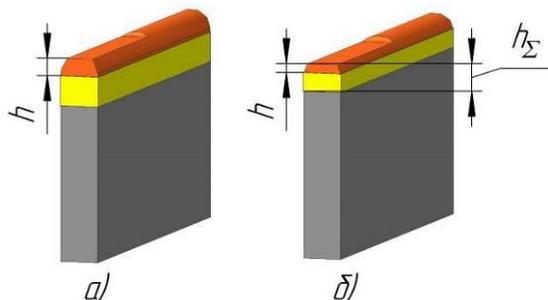


Рис. 9. Схема образцов после ППД, наплавленных:
а) на постоянном токе;
б) с двойным управлением переносом металла

Таким образом, для упрочнения ППД биметалла Р2М8 / 30ХГСА целесообразно ограничить температурный интервал деформации до диапазона $350...200$ °С. Твердость наплавленного металла увеличили с 650 $HV_{0,2}$ до 820 $HV_{0,2}$. Твердость металла ЗТВ увеличили с 350 $HV_{0,2}$ до 550 $HV_{0,2}$ на глубину $3,5$ мм за счет наклепа (рис. 8).

Технологией наплавки на постоянном токе получают наплавленный валик толщиной $h \geq 4$ мм, расположенный на слое металла ЗТВ пониженной твердости (рис. 9 а),

Для повышения вторичной твердости быстрорежущей стали и снятия остаточных напряжений, возникших в процессе наплавки, необходимо проводить отпуск. Для выбранного биметаллического материала рекомендуется температура однократного отпуска около 540 °С с выдержкой 40 мин и последующим охлаждением на спокойном воздухе. Термический цикл изготовления инструментального биметалла представлен на рис. 10.

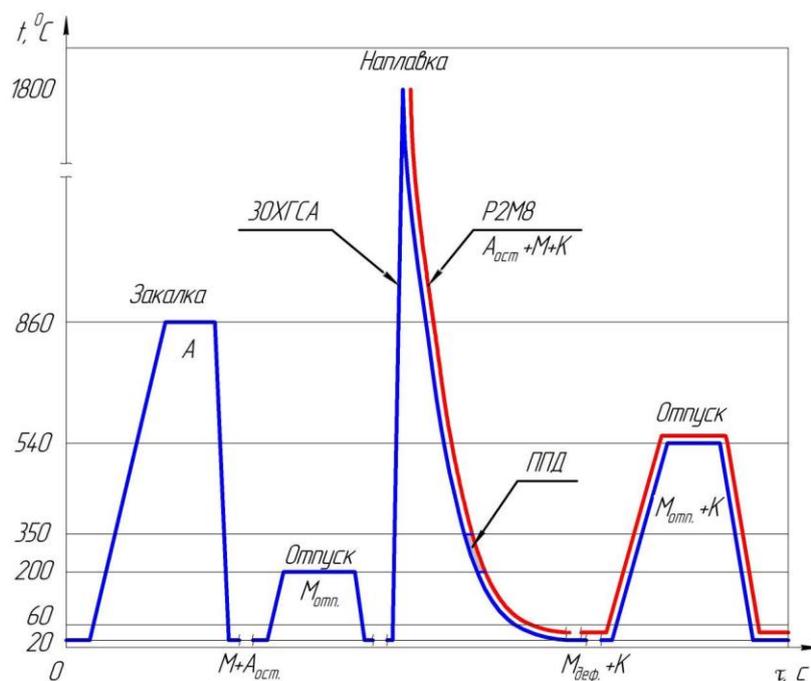


Рис. 10. Термический цикл изготовления инструментального биметалла по предлагаемой технологии

Выбранные параметры термической обработки обеспечили максимальную твердость наплавленной быстрорежущей стали за счет дисперсионного твердения (871 HV_{0,2}). Снимки структуры биметаллических образцов, изготовленных по предлагаемому способу, представлены на рис. 11.

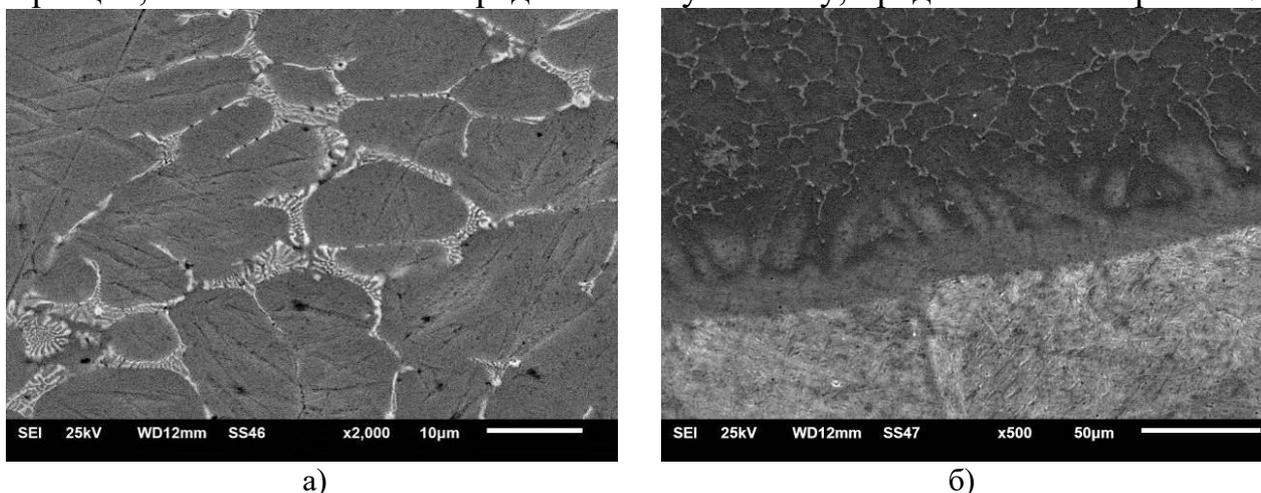


Рис. 11. Микроструктура биметаллического образца после отпуска в участке:
а) наплавленной быстрорежущей стали; б) сплавления

Ускоренное охлаждение наплавленного металла за счет использования наплавки с двойным управлением, последующее ППД и отпуск способствуют повышению красностойкости быстрорежущей стали. Согласно ГОСТ 19265-73, образцы биметалла были подвергнуты нагреву до 620 °С в течении 4-х часов. Твердость образца биметалла, изготовленного по типовой технологии (наплавка на постоянном токе, ППД и последующий отпуск) составила 787 HV_{0,2}, после нагрева и выдержки 580 HV_{0,2}. Твердость образца, изготовленного

по предлагаемой технологии (наплавка с ускоренным охлаждением, ППД и последующий отпуск) составила 871 HV_{0,2}, после нагрева и выдержки 745 HV_{0,2}. Требуемый уровень твердости после испытаний на красностойкость по ГОСТ 19265-73 составляет 58 HRC. Таким образом, предлагаемая технология обеспечивает требуемый уровень красностойкости (59 HRC) наплавленной P2M8, в то время как типовая технология не обеспечивает (51 HRC).

Для проверки эффективности предложенной технологии были проведены фрактографические исследования изломов (рис. 12). Исследования подтвердили сокращение протяженности участков ЗТВ в 1,5...1,7 раза при использовании наплавки с двойным управлением. На рис. 12 а) на изломе в начале участка отпуска заметна резкая граница, где произошло охрупчивание металла. Это вызвано отпускной хрупкостью 30ХГСА второго рода в интервале температур 450...650 °С, при которых и начал образовываться участок отпуска ЗТВ. На образцах, наплавленных с двойным управлением, такой резкой границы нет из-за высокой скорости охлаждения биметалла. Структура излома металла после отпуска более однородная, отсутствует четкая граница ЗТВ (рис.12 в). Внутренних дефектов в биметаллических образцах не выявили.

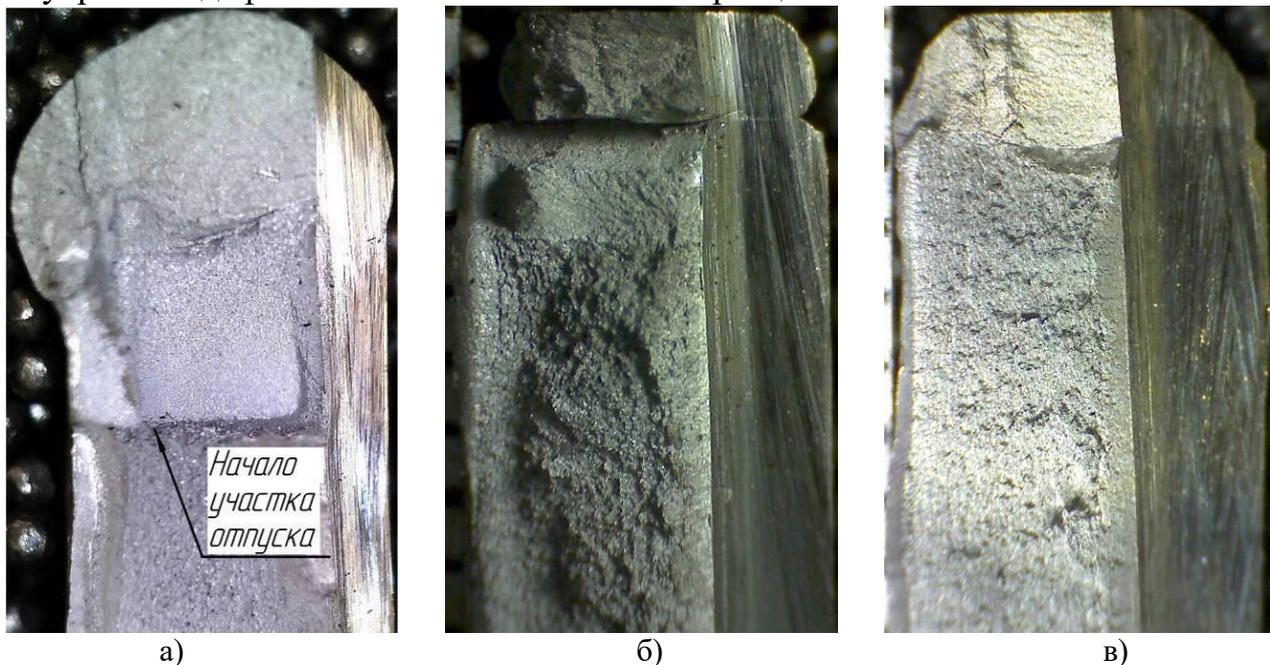


Рис. 12. Изломы образцов, наплавленных:

а) на постоянном токе; б) с двойным управлением переносом металла; в) с двойным управлением переносом металла и последующим отпуском

В пятой главе описана технология изготовления осевого металлорежущего инструмента с применением разработанного способа получения биметаллического инструментального материала на основе наплавленной термомеханически упрочненной быстрорежущей стали.

Изготовили опытную партию наплавленного биметаллического инструмента (насадной зенкер). Предварительно выполняли закалку корпуса инструмента (нагрев до 860 °С, охлаждение в масле) и низкотемпературный отпуск (нагрев до 200 °С, выдержка 60 мин, охлаждение на спокойном

воздухе). Наплавку выполняли в один слой на заготовку для формирования режущей кромки в среде защитного газа (аргон) порошковой проволокой ПП-Р2М8 диаметром 1,2 мм. ППД рабочей части инструмента осуществляли в процессе охлаждения наплавленного металла после наплавки в температурном интервале 350...200 °С. Затем выполняли отпуск при 540 °С с выдержкой 40 мин. и охлаждением на спокойном воздухе. После выполняли механическую и абразивную обработку заготовки насадного зенкера.

Твердость наплавленной деформированной стали Р2М8 после ППД и отпуска составила 800...870 HV_{0,2}. Глубина упрочнения составила 4,5 мм, при слое наплавленного металла 1,7 мм. Технологией изготовления биметаллического наплавленного инструмента обеспечили повышение твердости металла ЗТВ до 370 HV_{0,2} и сокращение её толщины на 1,5...1,7 мм. Подтверждена возможность уменьшения толщины наплавленного слоя в биметаллическом инструментальном материале с одновременным повышением эксплуатационных характеристик наплавленного слоя. Инструмент, изготовленный по разработанной технологии, прошел успешные испытания на ОАО «Центросвармаш» (г. Тверь).

Общие выводы

1. На основе проведенных исследований обоснованы и разработаны технологические рекомендации, позволяющие повысить надежность биметаллического инструмента за счет регулирования термического цикла наплавки и термомеханических воздействий на структуру наплавленной и конструкционной сталей. Предложенная технология включает предварительную закалку и отпуск корпуса инструмента, наплавку быстрорежущей стали с двойным управлением, ППД наплавленного металла и металла ЗТВ, а также однократный высокотемпературный отпуск биметалла. Способ защищен патентом RU 2627837 С1.

2. Установлено, что регулирование термического цикла наплавки позволяет получить структуру быстрорежущей стали с большим номером зерна за счет ускоренного охлаждения. Повышение скорости охлаждения способствует увеличению количества легирующих элементов в твердом растворе, что повышает красностойкость и твердость наплавленного металла. Наблюдается уменьшение толщины сетки первичных карбидов.

3. Выявлено, что уменьшение величины тепловложения при регулировании термического цикла наплавки позволяет превысить минимальную скорость охлаждения биметалла (Р2М8/30ХГСА), исключая образование ферритной составляющей в участке перегрева ЗТВ: ~ 14 °С/с. Уменьшение времени пребывания металла в интервалах критических температур (А₁-А₃) конструкционной стали в ЗТВ снижает степень роста зерна аустенита. Также за счет использования технологии наплавки с двойным управлением удалось сократить толщину наплавленного слоя с 4 мм до 2 мм, а протяженность ЗТВ уменьшить в среднем на 1...1,5 мм при одновременном увеличении твердости металла ЗТВ на 100 HV_{0,2}.

4. Установлено, что при ППД наплавленного слоя быстрорежущей стали за счет перехода остаточного аустенита в мартенсит деформации произошло увеличение твердости наплавленного металла на 170 HV_{0,2}. Степень деформации зерна быстрорежущей стали составила ~ 49%. Толщина наплавленного слоя P2M8 после ППД составила 1,7 мм.

5. Выявлено, что благодаря уменьшению толщины наплавленного металла при проведении ППД за счет наклепа удалось повысить твердость металла в ЗТВ на 200 HV_{0,2} на глубину 3...3,5 мм от участка сплавления. Обоснован оптимальный температурный диапазон 350...200 °С, при котором рекомендуется проводить ППД биметалла, исключая образование трещин в ЗТВ.

6. Установлено, что предлагаемые рекомендации к технологическому процессу изготовления наплавленного инструмента позволяют повысить твердость наплавленной стали P2M8 до 870 HV_{0,2} и 30ХГСА в ЗТВ до 370 HV_{0,2}.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Lavrentev, A.Y. Research of structural phase transformations in the fusion area of bimetallic punching tools [Текст] / A.Y. Lavrentev, A.M. Dozhdelev, D.N. Romanenko, A.V. Filonovich // Journal of chemical technology and metallurgy. – 2017. – №4 (52). – С. 707-710.

2. Лаврентьев, А.Ю. Совершенствование структуры зоны термического влияния наплавленного биметаллического инструмента [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. –2017. – №3. – С. 118-126.

3. Барчуков, Д.А. Назначение высокотемпературного отпуска быстрорежущих сталей с минимальным содержанием остаточного аустенита [Текст] / Д.А. Барчуков, А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев, А.А. Хохлов // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – №5. – С. 3-7.

4. Лаврентьев, А.Ю. Изменение структуры и свойств зоны термического влияния при изготовлении наплавленного инструмента из быстрорежущих сталей [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев, Д.А. Барчуков // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – №5 (56). – С. 14-20.

5. Романенко, Д.Н. Повышение износостойкости инструмента методом электроискрового легирования с применением электрода из переработанных отходов твердого сплава / Д.Н. Романенко, В.И. Шкодин, М.С. Терехин, А.М. Дожделев [Текст] // Сварочное производство Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – 2015. – №4 (965). – С. 50-53.

6. Дожделев, А.М. Влияние отпуска на свойства наплавленной быстрорежущей стали [Текст] / А.М. Дожделев // Проблемы машиностроения-2013: материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов машиностроительного факультета под ред. Мешкова В.В. –Тверь, 2013. –С.4-6.

7. Дожделев, А.М. Применение быстрорежущих сталей для изготовления металлорежущего инструмента [Текст] / А.М. Дожделев // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр./ под ред. В.В. Измайлова. – Тверь, 2014. – № 7. – С 124-128.

8. Лаврентьев, А.Ю. Изготовление зенкеров с повышенными эксплуатационными характеристиками для получения отверстий в труднообрабатываемых материалах [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев, И.А. Соколов, А.А. Хохлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. под ред. В.В. Измайлова. – Тверь, 2014. – № 7. – С. 108-110.

9. Дожделев, А.М. Изготовление осевого инструмента с повышенными эксплуатационными характеристиками для обработки изделий из труднообрабатываемых материалов [Текст] / А.М. Дожделев // XXI Каргинские чтения: тезисы докладов. – Тверь, 2014. – С. 30.

10. Дожделев, А.М. Применение стали 30ХГСА в качестве материала корпуса металлорежущего инструмента [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев // Новые материалы и технологии в машиностроении/ Под общей редакцией Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. – Брянск, 2014. – № 19. – С. 45-48.

11. Дожделев, А.М. Возникновение зоны термического влияния при изготовлении наплавленного металлорежущего инструмента [Текст] / А.М. Дожделев, А.Ю. Лаврентьев, Н.С. Зубков // Сборник научных трудов по итогам Международной научно-технической конференции под общей редакцией. А. Памфилова «Новые материалы и технологии в машиностроении». 2014. – № 19. – С. 48-52.

12. Лаврентьев, А.Ю. Изготовление трехмерных изделий в машиностроении с применением наплавки. [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, Е.А. Сурсимов, А.М. Дожделев // Материалы 16-й. Международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» в 2 ч. Часть 1. – СПб, 2014. – С. 86-88.

13. Дожделев, А.М. Повышение энергоэффективности процесса наплавки биметаллического инструмента / А.М. Дожделев, А.Ю. Лаврентьев // Материалы XII Международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век». – Орел, 2014. – С. 83-85.

14. Дожделев, А.М. Способы внешнего периодического воздействия на металл подложки в процессе наплавки [Текст] / А.М. Дожделев, А.Ю. Лаврентьев // Материалы XII Международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век». – Орел, 2014. – С. 97-99.

15. Лаврентьев, А.Ю. Совершенствование структуры и свойств металла в зоне термического влияния, возникающей при наплавке металлорежущего инструмента [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев // Наука и технология.

Материалы 34-й Всероссийской конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Том 4. – М., 2014. – С. 172-177.

16. Дожделев, А.М. Исследование процессов, протекающих в зоне термического влияния при наплавке на термообработанную конструкционную сталь 30ХГСА [Текст] / А.М. Дожделев, А.Ю. Лаврентьев // Материалы XX-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении – 2014». – Брянск, 2014. – № 20. – С. 50-55.

17. Lavrentev, A.Y. Improving the reliability of bimetallic tool by improving Structure and properties of heat affected zone [Текст] / A.Y. Lavrentev, A.M. Dzhdelev // European Science and Technology: materials of the VIII international research and practice conference. – Munich, 2014. – С. 377-383.

18. Лаврентьев, А.Ю. Снижение энергозатрат в процессе послойной наплавки заготовок деталей [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев // Энергоресурсосбережение в промышленности: сборник научно-практических трудов под ред. А.Н. Аустенизация сталей в неравновесных условиях. Тверь, 2015. – № 3. – С 50-54

19. Лаврентьев, А.Ю. Применение методов фрактографии для оценки качества износостойких наплавленных поверхностных слоев [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. под ред. В.В. Измайлова. – Тверь, 2016. – № 9. – 152 с.

20. Барчуков, Д.А. Роль легирующих элементов быстрорежущих сталей в процессах карбидообразования при реализации способа упрочнения наплавленной быстрорежущей стали [Текст] / Д.А. Барчуков, А.М. Дожделев // Новые решения в области упрочняющих технологий: взгляд молодых специалистов: сборник научных статей материалы международной научно-практической конференции (22-23 декабря 2016 года). В 2-х томах, Том 1. – Курск, 2016. – С.181-184.

21. Дожделев, А.М. Способы ремонта и восстановления поверхностей деталей машин [Текст] / А.М. Дожделев // Наука сегодня: теоретические и практические аспекты: материалы международной научно-практической конференции, 28 декабря 2016 г. В 2 частях. Часть 1. – Вологда, 2017. –С. 23-25.

22. Лаврентьев, А.Ю. Аустенизация сталей в неравновесных условиях [Текст] / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дожделев // Наука, техника и образование. – 2016. – № 12(30). – С. 43-46.

23. Дожделев, А.М. Обеспечение износостойкости рабочих частей штампового инструмента [Текст] / А.М. Дожделев, А.Ю. Лаврентьев, Д.А. Барчуков // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр./ под ред. В.В. Измайлова. – Тверь, 2017. – №10. – С. 37-41.

24. Способ изготовления наплавленного биметаллического режущего инструмента [Текст]: пат. 2627837 Рос. Федерация: МПК⁷ В 23 Р 15/28, С 21 D 8/00, С 21 D 9/22, С 21 D 7/13, В 23 К 9/04 / Дожделев А.М., Лаврентьев А.Ю.; патентообладатель Тверской гос. тех. ун-ет. – № 2016106380; заявл. 24.02.2016; опубл. 11.08.2017, Бюл. № 23. – 12 с.