

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Ю.В. Баранов



БАРАНОВ
Юрий Викторович

Академик Российской академии космонавтики, Академии проблем качества, Всемирной академии комплексной безопасности и член-корреспондент Российской инженерной академии. Заместитель директора Института машиноведения имени А.А. Благоднарова Российской академии наук. Научный руководитель лаборатории комплексных физико-механических исследований материалов. Специалист в области физического материаловедения, физики металлов, материаловедения в машиностроении, физических методов исследования материалов, металловедения и термообработки металлов. Автор более 150 научных работ, в том числе 5 монографий.

Введение

Проблема получения оптимальных свойств металлов и сплавов путем воздействия электрического тока исследуется достаточно давно [1–8]. В настоящее время разработано большое количество типов электрических печей для обработки металлов в производстве [9–11]. Значительный вклад в развитие новых технологий электрообработки металлов и сплавов внесли Г.И. Бабат, М.Г. Лозинский, В.И. Иванов, М.Н. Бодяко, С.А. Астапчик, И.Н. Кидин, О.А. Троицкий, Н.Н. Беклемишев, К.М. Климов, Ю.И. Головин, В.Н. Гриднев, В.Е. Громов, Э.В. Козлов и др.

Влияние электронагрева на свойства металлических материалов исследовали комплексно при прямом и косвенном (индукционном) воздействиях электрического тока на металлы. Получен большой экспериментальный и теоретический материал. Однако некоторые вопросы до настоящего времени изучены недостаточно. Кроме того, появление новых материалов также представляет интерес для изучения. Так, например, мало изученными являются инструментальные быстрорежущие стали типа Р6М5, Р18, Р8М3, Р12, Р6М5К5, Р6М5К8 и другие, широко используемые в настоящее время в производстве. Замена доро-

гостящего вольфрама на молибден привела к снижению металлорежущих свойств инструмента. Одним из возможных методов повышения износостойкости инструмента из вольфрамомолибденовых сталей, по-видимому, может быть обработка импульсным электрическим током (ИЭТ). Для этих сталей данная проблема изучена еще недостаточно. Исследование влияния импульсного электрического тока на структуру закаленных сталей Р6М5, Р18, возможно, поможет разработать новую технологию повышения стойкости металлорежущего инструмента.

В данной статье автор рассматривает влияние обработки ИЭТом на физико-механические свойства стали Р6М5, предлагает описание аппаратуры ИЭТ и экспериментальные результаты этого воздействия.

Термическая обработка металлов при быстром нагреве

При нагреве в печах и ваннах передача энергии происходит извне, скорость нагрева ограничивается условиями теплопередачи из внешней среды в металл (лучеиспусканием или конвекцией) и теплопроводностью металла. При электронагреве энергия выделяется непосредственно в нагреваемом теле в результате прохождения через него электрического тока, поэтому интенсивность нагрева гораздо выше. Время нагрева в большинстве случаев соответствует секундам и долям секунды. Это создает ряд таких технологических преимуществ, как высокая производительность, слабое окисление и обезуглероживание поверхности нагреваемых изделий [1, 9, 11–13].

Вместе с тем при быстром нагреве фазовые превращения в стали протекают за весьма короткое время, недостаточное для завершения диффузионных процессов. Это вызывает ряд особенностей, которые следует учитывать при разработке новых технологий термической обработки. Чем быстрее происходит нагрев, тем при более высокой температуре завершается процесс образования аустенита. При дли-

тельности нагрева менее 12–14 с температура аустенизации должна быть существенно выше равновесной, и ее выбирают экспериментально в зависимости от состава стали и характера исходной структуры. При быстром нагреве аустенит получается неоднородным по углероду и легирующим элементам. Обеспечить его гомогенизацию (например, при нагреве под закалку легированных сталей) можно с помощью изотермической выдержки, дозируя передаваемую в сталь энергию путем регулирования режимов электронагрева. При быстром электронагреве зерно аустенита не успевает вырасти до величин, получаемых при термической обработке с нагревом в печи. Его размер обычно соответствует 11–12 баллам стандартной шкалы (ГОСТ 5639-82), в то время как при печном нагреве – 7–8 баллам.

Применение электронагрева позволяет коренным образом повысить культуру производства, механизировать и автоматизировать процесс термической обработки, встраивать термические установки непосредственно в линии механической обработки деталей. Наряду с этим электронагрев при правильном его использовании способен обеспечить существенно более высокие эксплуатационные свойства термически упрочненных деталей машин, повысить их надежность и долговечность.

Новые технологии упрочнения быстрорежущих инструментальных сталей

Разработка новых технологий основывается на изучении фундаментальных закономерностей поведения инструментальных сталей при таких температурно-силовых режимах воздействия, как лазерное, химико-термическое, термоциклическое, магнитно-импульсное, электромагнитное, ударное, плазменное, ультразвуковое и др.

Лазерное упрочнение инструмента из быстрорежущих сталей Р18Ф2К8М, Р18, Р6М5, Р6М5К5, Р6М5Ф3 позволяет в 1,5–3 раза повысить его стойкость по сравнению с необработанным [14]. Исследования микроструктуры

и свойств сталей, подвергнутых лазерной обработке, показывают, что после лазерной закалки происходит растворение карбидов, измельчение зерна. Степень растворения карбидов закономерно определяется исходной структурой, режимом лазерной обработки и составом стали. Однако лазерная закалка быстрорежущих сталей, модифицируя поверхность, не устраняет дефектов объемной термообработки.

Химико-термическая обработка (ХТО) существенно влияет на структуру и свойства быстрорежущих сталей Р6М5, РЭМ4К8, Р12ФЗ, Р18 [15]. С учетом этого разработаны технологические параметры газовой нитроцементации и азотирования в тлеющем разряде для различных инструментов. Толщина получаемого диффузионного слоя составила 0,03–0,1 мм, микротвердость 1100–1200 МПа, что в 1,5–1,8 раза выше микротвердости сердцевины. Установлено, что износостойкость нитроцементованных колодок в 1,5–2 раза, а азотированных – в 1,3–1,8 раза выше износостойкости колодок без ХТО. В производственных условиях стойкость сверл, подвергнутых ХТО, повысилась в 2–2,5 раза.

Наложение магнитного поля напряженностью 320 кА/м влияет на твердость и количество остаточного аустенита при отпуске термомеханически упрочненной стали Р6М5 [11]. Установлено, что отпуск стали в магнитном поле ускоряет распад аустенита. Однократный отпуск в магнитном поле при температуре 560°С с выдержкой 1 ч приводит к полному превращению остаточного аустенита. При температуре 540°С полное превращение остаточного аустенита происходит после двукратного отпуска продолжительностью 0,5 ч. В результате проведенной обработки повышаются износостойкость и твердость стали.

Технология упрочнения инструментальных сталей У8, У10, Р6М5, Р18 мощными ионными пучками повышает износостойкость инструмента до 10 раз. Облучение проводилось ионами углерода с энергией 300 кэВ при плотности ионного тока 60–150 А/см² и длительности

импульса 50–100 нс [16]. Установлено, что наличие наклепанного слоя вблизи поверхности способствует распространению ионов углерода в материал и усилению эффекта упрочнения.

Технология диффузионного хромирования быстрорежущей стали Р6М5 существенно повышает ее износостойкость, хотя малая толщина слоя требует малых удельных нагрузок при работе инструмента [17]. Хромирование проводилось газовым методом. Толщина получаемого слоя составила 0,02–0,05 мм, его состав – карбиды и карбонитриды с небольшим количеством α -фазы. Микротвердость слоя составляет 17000–18000 МПа. Свойства слоя сохраняются до температуры 1000°С. Кроме того, авторами работы [17] предлагается технология диффузионного упрочнения быстрорежущей стали Р6М5 углеродом. Посредством цементации в твердом карбюризаторе с последующей закалкой с температурой 1220–1240 °С и трехкратным отпуском при температуре 560 °С получен материал с толщиной диффузионного слоя 0,3–1,0 мм. Износостойкость инструмента возросла в 1,5 раза. Существенное повышение износостойкости может быть получено за счет введения в сталь ванадия и углерода.

Создание в материалах направленной (текстурированной) структуры в 1,5–2,5 раза повышает износостойкость металлорежущего инструмента, что является дополнительным структурным фактором упрочнения [18].

Технология повышения износостойкости инструмента из сталей Р6М5, Р6М5К5, Р18 и других импульсным магнитным полем позволяет, например, повысить износостойкость сверл в 1,6–2,5 раза из сталей Р6М5 и Р18 [12].

Опыты по сверлению стали 45НФ инструментом из быстрорежущих сталей Р18, Р9К5Ф и Р6М5, обработанных импульсным магнитным полем, показали, что оптимальная напряженность поля при магнитноимпульсной обработке (МИО) составляет 300–800 кА/м [12]. Влияние продолжительности магнитно-импульсной обработки при постоянной напряженнос-

ти поля 300–800 кА/м на стойкость инструмента изучали на сверлах, фрезах и пилах из быстрорежущей стали Р6М5, а также на инструментах, оснащенных вставками из твердых сплавов ВК6 и Т15К6 [8]. Опыты проводились при резании стали 40Х со следующими режимами: при сверлении скорость резания 10–20 м/мин, подача 0,12–0,33 мм/об; при фрезеровании скорость – 5–30 м/мин, подача фрезы – 0,02–0,03 мм/зуб; при резании на дисковой пиле – скорость резания 20–26 мм/мин, подача пилы 0,05–0,10 мм/зуб. При оптимальной напряженности поля 430–800 кА/м максимальная стойкость инструмента достигается при длительности импульса 0,5–1,5 с. Максимальное повышение стойкости инструмента наблюдается в тех случаях, когда импульс тока имеет форму ломаной линии, например, трапецеидальную, треугольную, прямоугольную или комбинированную.

К недостаткам индукционной магнитно-импульсной обработки можно отнести то, что при этой обработке упрочняется только поверхностный слой, тогда как объемные слои инструмента не упрочняются, и переточка сверл, резцов и инструментов устраняет эффект упрочнения.

Конкурирующим способом упрочнения является контактное (непосредственное) пропускание ИЭТ через металлорежущий инструмент. Однако при этом появляется необходимость заточки инструмента. Данный недостаток можно устранить, если использовать упрочнение импульсным электрическим током в технологической цепочке изготовления инструмента перед заточкой. Таким образом, появляются возможности устранения печного нагрева под закалку и отпуск и автоматизации процесса изготовления инструмента.

Проходя через проводящий материал, склонный к структурным и фазовым превращениям, импульсный электрический ток действует в первую очередь на элементы структуры, обладающие избыточной запасенной энергией, например, на области со скоплениями дислокаций, примесных атомов, вакансий и т.д.,

вызывая необходимые физико-химические процессы в материале, которые еще недостаточно изучены. Изучение этих процессов и управление ими может привести к необходимому качеству материала – повышенной твердости (за счет дисперсионного твердения), вязкости (за счет получения мелкого зерна), прочности, пластичности, износостойкости.

Таким образом, в применении к таким инструментальным сталям, как быстрорежущие Р18, Р12, Р6М5 и другим, задача видится следующим образом: изучить фазовые и структурные превращения и механические свойства сталей, подвергнутых воздействию импульсного электрического тока, и разработать технологии повышения стойкости инструмента.

Анализ проблемы упрочнения быстрорежущих сталей импульсным электрическим током, а также литературных источников позволяет сделать следующие выводы:

1. Исследования воздействия ИЭТ на быстрорежущие стали Р18, Р6М5 не проводились.

2. При изучении механизмов упрочнения сталей данного класса следует обратить внимание на комплексное изменение физико-механических свойств и интенсивность изнашивания сталей в результате электроимпульсной обработки.

3. В процессах перестройки структуры сталей при обработке ИЭТ, приводящей к упрочнению, основная роль принадлежит дисперсионному твердению, выделениям карбидов различной морфологии и структуры, перераспределению легирующих компонентов (W, Mo, V) в мартенсите, концентрации углерода в мартенсите.

4. Важное значение имеет однородность выделяющихся при отпуске мартенсита карбидов по размерам. Наибольший эффект повышения износостойкости дают мелкие карбиды, когерентно связанные с решеткой α -раствора.

5. Растворение больших карбидов и достижение размерной однородности карбидов – один из основных механизмов формирования оптимальных свойств быстрорежущих сталей при обработке ИЭТ.

Энергетический источник ИЭТ и системы регистрации параметров внешнего воздействия

Для получения импульсов тока применяются специальные импульсные генераторы, энергоемким элементом в которых служат индуктивные и емкостные накопители или электрическая машина и сварочные трансформаторы большой мощности.

Для проведения экспериментов использовался низковольтный источник переменного тока промышленной частоты, выполненный на базе трансформатора ОСУ-40 мощностью 40 кВт. Основными силовыми элементами его являются: трансформатор тока, выпрямительное устройство, собранное из вентилях В-800, устройство управления, работающее как в ручном, так и автоматическом режимах и позволяющее регулировать амплитуду тока в диапазоне от 0 до 10000 А и длительность суммарного импульса от 0,02 с до 1 мин.

Низковольтный источник, позволяет получать оптимальные величины энергии, передаваемой материалу, как при непрерывных процессах производства полуфабрикатов, так и в лабораторной практике при механических испытаниях образцов.

Конструкция подобных источников проста, они практически безопасны для персонала и могут быть использованы непосредственно в цеховых условиях для работы в непрерывных технологических линиях.

В целях обеспечения возможности деформирования материалов при одновременном воздействии ИЭТ на базе установки ИМАШ-20-78 была создана комплексная установка для физико-механических исследований материалов с электронно-микроскопическим наблюдением изменений структуры при тепловых и деформационных воздействиях и обработкой микроструктурных изображений. Для этих целей использовались растровый электронный микроскоп РЭМ-100 и анализатор изображений Микросвит, собранные воедино с низковольтным источником ИЭТ (рис. 1).

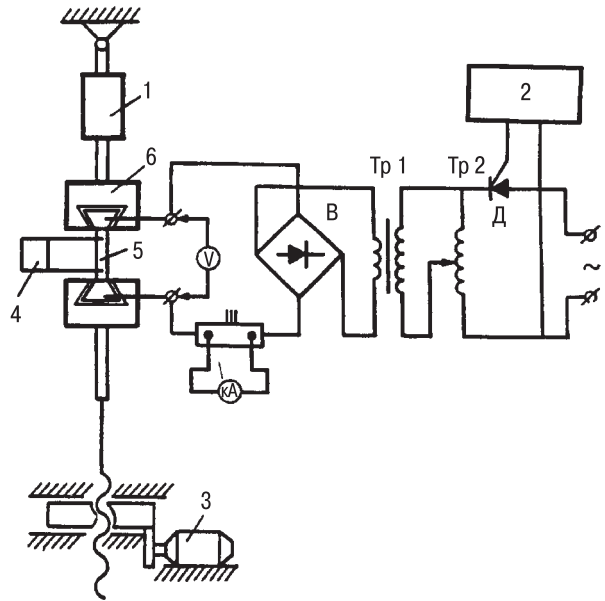


Рис. 1. Схема соединения низковольтного источника импульсного электрического тока и установки ИМАШ-20-78:

- 1 – измеритель нагрузки; 2 – блок управления;
3 – двигатель; 4 – датчик деформации;
5 – образец; 6 – захваты образца

Устройство для обработки импульсным электрическим током металлорежущего инструмента

Схема устройства представлена на рис. 2. Цанговая часть образца (сверло) крепится в медных зажимах, перемещающихся по направляющим стержням. К режущей части сверла подводится пружинный контакт. На расстоянии 10 мм от торцевой части сверла к боковой режущей кромке приваривается спай хромель-алюмелевой термопары диаметром 0,4 мм.

На пульте управления импульсов (РЦС-403ТЧ) устанавливаются режим обработки материала: длительность импульса τ , ток I , напряжение U . При нажатии пусковой кнопки сигнал от устройства РЦС-403ТЧ поступает на полумост терристоров, которые подключают первичную обмотку низковольтного трансформатора к сети напряжения, в результате чего ток вторичной обмотки трансформатора по шинам поступает на зажимы и медный подпружиненный контакт. Данная система обеспечивает обработку материала импульсным током опреде-

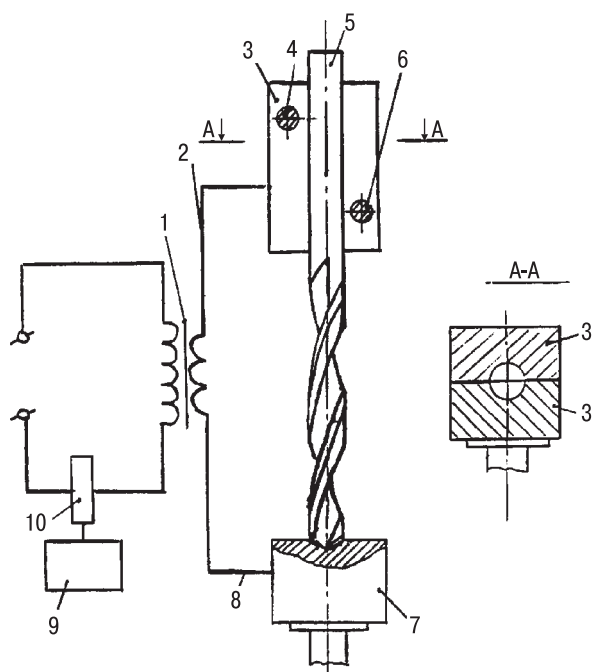


Рис. 2. Схема установки

для электроимпульсной обработки сверл:

- 1 – низковольтный трансформатор; 2, 8 – шины;
- 3 – зажимы; 4, 6 – направляющие стержни;
- 7 – подпружиненный контакт; 9 – пульт управления;
- 10 – полумост терристоров

ленной мощности и длительности. К примеру, длительность импульсов варьировали от 0,02 с до 0,6 с, температуру нагрева от 100 до 1000°C, скорость нагрева – от 150 до 6000°C/с.

Влияние импульсного электрического тока на физико-механические свойства стали Р6М5

Исследовались изменения микротвердости H , интенсивности изнашивания J , ударной вязкости a , фазового состава и концентрации C легирующих элементов (вольфрама, молибдена, ванадия) в мартенситной матрице быстрорежущей стали Р6М5 под воздействием импульсного электрического тока большой мощности. При обработке образцов стали с различными скоростями нагрева, задаваемыми длительностью импульса и величиной тока, температура нагрева образцов, регистрируемая термопарой, изменялась от 80 до 600°C.

По результатам измерения микротвердости до и после обработки образцов выбиралась температура нагрева (в данном случае она рав-

нялась 150°C), при которой достигалась максимальная микротвердость. Затем определялись физико-механические свойства образцов стали, нагретых ИЭТ с различными скоростями нагрева до температуры 150°C. Результаты статистически обрабатывались и строились зависимости изменения свойств материала от скорости нагрева V_H . Сопоставление различных функциональных графических зависимостей позволило достаточно точно определить параметры обработки стали Р6М5, при которых достигается необходимое сочетание свойств, обеспечивающих надежную эксплуатацию металлорежущего инструмента. В данном случае оптимизация свойств проводилась по интенсивности износа.

Анализ экспериментальных результатов

На рис. 3 и 4 представлены зависимости изменения свойств стали Р6М5 после нагрева до температуры $T_H = 150^\circ\text{C}$ с различными скоростями нагрева при числе термоциклов один и пять, соответственно. Каждый последующий термоцикл проводили после охлаждения образца до нормальной температуры. Такая постановка эксперимента связана с тем, что графики изменения свойств обработанной заготовки, в данном случае образца, от числа термоциклов имеют экстремумы. Так, максимальная твердость стали Р6М5 в данном случае достигается при пяти термоциклах. Из графиков (рис. 3,а и 4,а) следует, что как при одном, так и при пяти термоциклах максимальная микротвердость получается при скорости нагрева 800°C/с, при скоростях нагрева, меньших 500 и больших 800°C/с, микротвердость уменьшается. Увеличение числа термоциклов до пяти приводит к возрастанию микротвердости примерно на 15%.

Из приведенных графиков (рис. 3,б и 4,б) видно, что максимальная интенсивность изнашивания наблюдается у образцов, нагреваемых со скоростью примерно 250°C/с, что соответствует минимуму микротвердости. Минимум интенсивности изнашивания достигается при

скорости нагрева 800–1000°С/с. При этом минимальная интенсивность изнашивания наблюдается у образцов, обработанных пятью термоциклами, что опять коррелирует с аналогичным изменением микротвердости. Минимум функции $J=f(V_H)$ сдвигается в сторону больших скоростей нагрева при пяти термоциклах обработки, что, по-видимому, связано с необходимостью предотвращения процессов возврата физико-механических свойств стали, а это, в свою очередь, требует более высоких скоростей нагрева.

Необходимо отметить наличие двух минимумов функции $a = f(V_H)$, при $V_H = 250^\circ\text{C}/\text{с}$ и $V_H = 600^\circ\text{C}/\text{с}$, и двух максимумов, при скоростях нагрева 500 и 1200°С/с. Эти изменения ударной вязкости a коррелируют с функциональными зависимостями, отражающими изменение

концентрации легирующих элементов W , Mo и V , являющимися основными карбидообразующими компонентами в стали Р6М5, в зависимости от скорости нагрева. Из графиков (рис. 3, в и 4, в) хорошо видно, что существует взаимосвязь между концентрацией C легирующих элементов в мартенсите и ударной вязкостью.

Минимумы ударной вязкости a соответствуют наименьшей концентрации C легирующих элементов в мартенсите при скоростях нагрева 100 и 600°С/с. Максимумы a соответствуют максимумам концентрации C легирующих элементов при скоростях нагрева 400 и 1200°С/с. При увеличении числа термоциклов эффект упрочнения возрастает, как это и было обнаружено ранее.

Хорошо выявляется обратная зависимость между микротвердостью H и интенсивностью

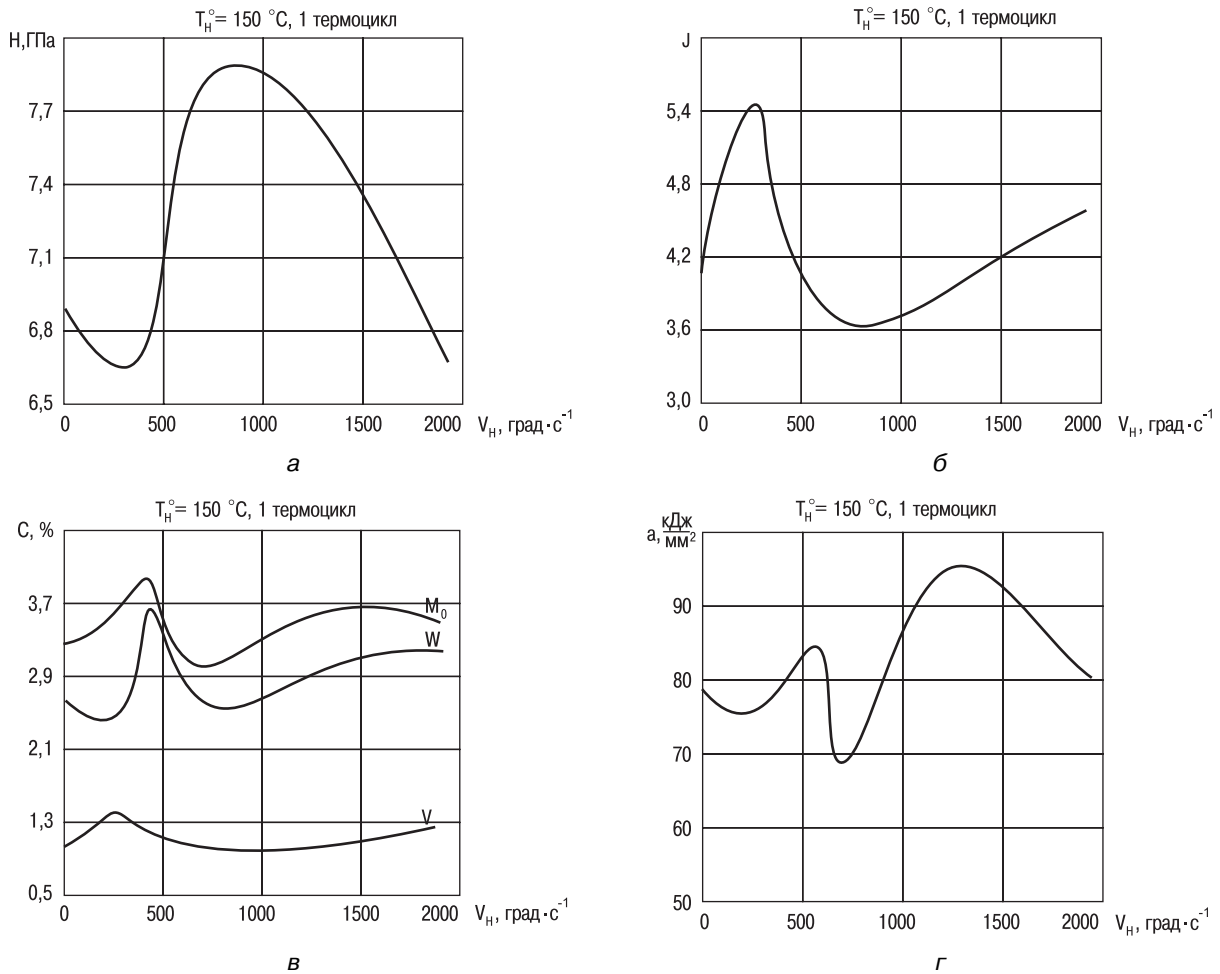


Рис. 3. Изменения свойств стали Р6М5 при обработке одним импульсом ИЭТ в зависимости от скорости нагрева V_H ; а – микротвердости H ; б – интенсивности изнашивания J ; в – концентрации легирующих элементов C ; г – ударной вязкости a

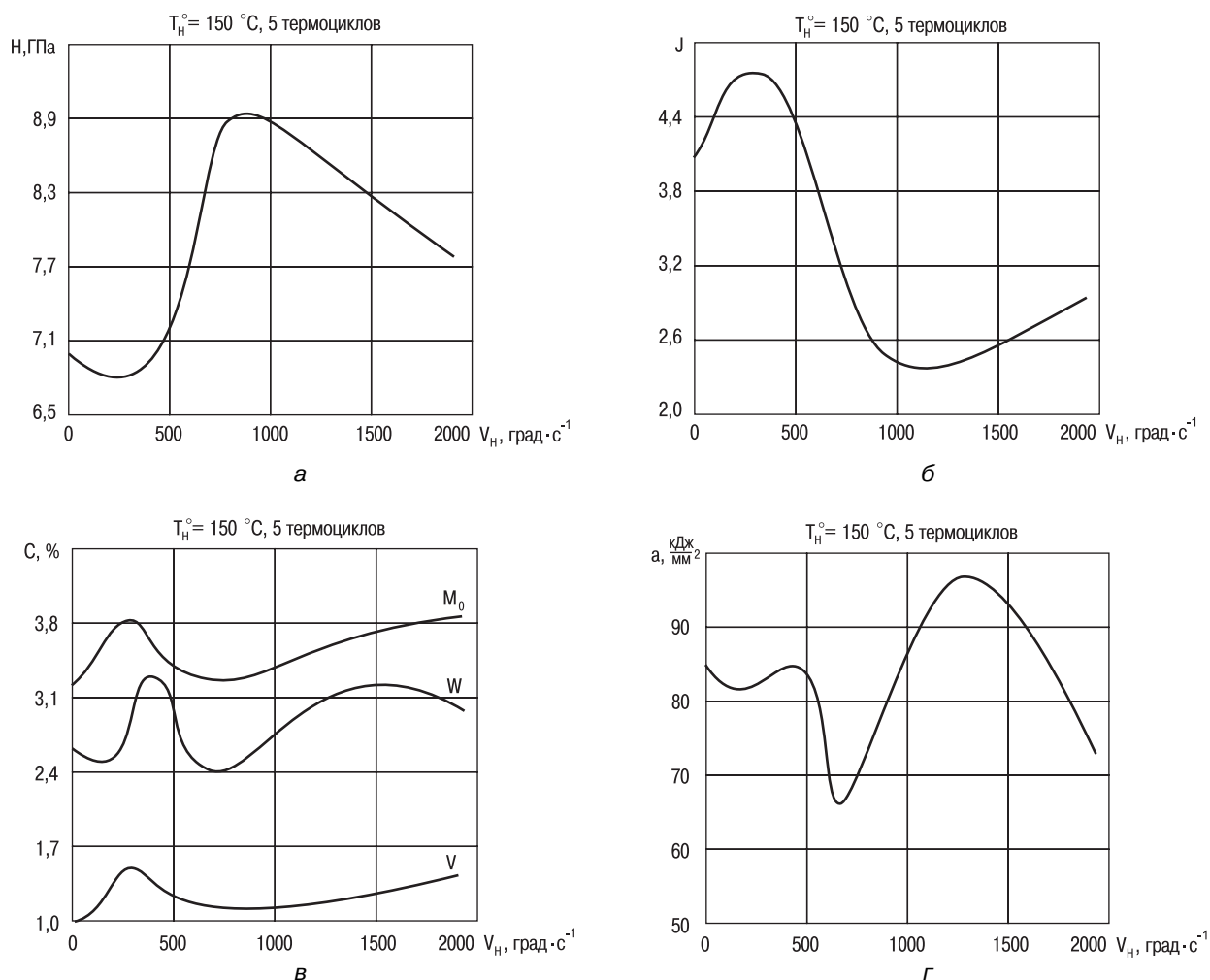


Рис. 4. Изменения свойств стали Р6М5 при обработке пятью импульсами ИЭТ в зависимости от скорости нагрева V_n : а – микротвердости H ; б – интенсивности изнашивания J ; в – концентрации легирующих элементов C ; г – ударной вязкости a

изнашивания J при одном и пяти термоциклах обработки. Получена определенная корреляция между концентрацией C легирующих компонентов в мартенсите и интенсивностью изнашивания J . Увеличение содержания V и Mo в мартенсите повышает интенсивность изнашивания J , наоборот, уменьшение их концентрации резко снижает J . Выделение мелких карбидов ванадия VC при обработке импульсами тока приводит к упрочнению матрицы, при этом концентрация V в мартенсите падает, так как он связывается в карбиды.

Мелкие карбиды ванадия VC , размером в сотые и менее доли микрометра, являются одной из главных причин повышения твердости и износостойкости материала. По мере увеличения скорости нагрева создаются благо-

приятные условия для образования карбидов вольфрама, молибдена и ванадия, которые образуются в местах максимального тепловыделения, а именно – на дефектах структуры, границах зерен, микропор, скоплениях дислокаций. При этом локальные температуры нагрева могут достигать значений, существенно превышающих среднюю температуру по образцу, именно в этих местах и происходит быстрое образование карбидов. Поскольку в реальном сплаве существует достаточно большое количество микроискажений, то и плотность карбидов также высока. Размеры карбидов должны сохраняться малыми – сотые доли микрометра, в противном случае происходит нарушение когерентной связи между матрицей и карбидом, и эффект упрочнения

пропадает. Это, по-видимому, происходит при повышении скорости нагрева. Увеличение скорости нагрева требует увеличения амплитуды пропускаемого через образец электрического тока, что приводит к существенному перегреву металла в области микродефектов. При этом возможны процессы неконтролируемого роста размеров карбидов и нарушение когерентности между карбидами и матрицей. Кроме того, менее интенсивно протекают процессы возврата свойств сплава.

Необходимо отметить, что вольфрам, молибден и ванадий образуют с железом твердые растворы замещения, усиливая тем самым межатомное взаимодействие и, в конечном счете, повышая прочность стали. Выделение из сплава в большом количестве этих компонентов разупрочняет его, но образование карбидов, когерентно связанных с матрицей – мартенситом, приводит к упрочнению, повышению твердости и износостойкости сплава.

Список литературы

1. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – М.: Энергия, 1965. – 552 с.
2. Ковреев Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов. – М.: Metallurgia, 1975. – 327 с.
3. Аршингер И. Инструментальные стали и их термическая обработка: справочник. – М.: Metallurgia, 1982. – 313 с.
4. Гуляев А.П., Малинина К. А., Саверина С.М. Инструментальные стали: справочник. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
5. Иех Я. Термическая обработка стали: справочник. – М.: Metallurgia, 1970. – 264 с.
6. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Metallurgia, 1975. – 584 с.
7. Сорокин З.Г., Волосникова А.В. и др. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
8. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
9. Лозинский М.Г. Промышленное применение индукционного нагрева. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 471 с.
10. Бабошин А.Л. Metallographia и термическая обработка железа, стали, чугуна. Ч. 1 и 2. – М.; Л.: ОНТИ, НКТП СССР, 1935. – 900 с.
11. Баранов А.А. Фазовые превращения и термодублирование металлов. – Киев.: Наукова думка, 1974. – 232 с.
12. Иванов В.И., Осипов К.А. Возврат и рекристаллизация в металлах при быстром нагреве. – М.: Наука, 1964. – 188 с.
13. Григорьев А.К., Коджаспиров Г.Е. Термомеханическое упрочнение стали. – Л.: Машиностроение, 1985. – 144 с.
14. Влияние лазерного упрочнения на структуру и свойства инструментальных быстрорежущих сталей / В.А. Савельев, Н.Н. Шакуров, Б.Д. Петров и др. // Сб. тезисов докладов 13-й Всесоюзной конференции по тепловой микроскопии «Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур». – Каунас.: КПИ им. А. Снечкуса, 1989. Т.1. С. 213.
15. Исследование влияния химико-термической обработки на структуру и свойства быстрорежущей стали / В. Бахмат, З.М. Самойлов, Ф.Н. Просвинова и др. // Сб. тезисов докладов 13-й Всесоюзной конференции по тепловой микроскопии «Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур». – Каунас.: КПИ им.А.Снечкуса, 1989. Т. 2. С. 163.
16. Отпуск в магнитном поле термомеханически упрочненной стали Р6М5. Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов / Л.М. Капуткина, С.В. Добаткин, А.П. Власов и др. // Юрмала. Тезисы докладов 2-й Всесоюзной конференции. – Николаев: РИО Облполиграфиздтата, 1990. С. 67.
17. Влияние исходной поверхностной обработки при упрочнении инструментальных сталей мощными ионными пучками / И.Г. Романов, И.Н. Царева, Е.П. Москвичев и др. // Структура и прочность материалов в широком, диапазоне температур. – Воронеж: ВПИ, 1992. С. 102.
18. Коршикова Н.В., Софрошенков А.Ф. Исследование влияния процессов диффузионного хромирования на свойства быстрорежущих сталей // Структура и свойства материалов. – Новокузнецк: СМИ, 1988. С. 54.