

УДК 621.98.044.7

А. В. Алифанов¹, Г. П. Горецкий, А. М. Милюкова², А. А. Лях, В. Н. Шишмолин

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,
ул. Купревича, 10, 220004 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 267 60 10, ¹alifanov_aav@mail.ru, ²annart@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ
НА МИКРОТВЁРДОСТЬ И МИКРОСТРУКТУРУ ОБРАЗЦОВ СТАЛЕЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РУБИЛЬНЫХ НОЖЕЙ**

Исследованию подвергались образцы из ряда инструментальных сталей, предоставленные российским ООО «Инпласт» (Волгодонск) в целях определения оптимальных режимов магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) каждой стали, применяемой для изготовления рубильных ножей, используемых при производстве технологической щепы. Полученные результаты показали, что МИО при определённых режимах оказывает существенное влияние на микроструктуру всех исследуемых сталей. На поверхности образцов образуется мелкодисперсный, однородный слой глубиной от 50 до 250 мкм с повышенной микротвёрдостью. Определены оптимальные режимы МИО для различных сталей.

Ключевые слова: образцы сталей; магнитно-импульсная обработка; микроструктура; микротвёрдость; режимы обработки.

Рис. 11. Библиогр.: 5 назв.

A. V. Alifanov¹, G. P. Goretsky, A. M. Milyukova², A. A. Lyakh, V. N. Shishmolin

State Scientific Institution “Physical-Technical Institute, The National Academy of Sciences of Belarus”,
10, Kuprevicha str., 220004 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 267 60 10, ¹alifanov_aav@mail.ru, ²annart@mail.ru

**RESEARCH OF INFLUENCE OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT MODES ON
MICROHARDNESS AND MICROSTRUCTURE STEEL SAMPLES USED FOR CHIPPER
KNIVES MANUFACTURE**

Several samples of tool steel provided by the Russian firm ООО “Inplast” (Volgodonsk) were studied in order to identify optimal modes of magnetic-pulse processing (MPP) for each kind of steel, aimed for manufacture of chipper knives which are used in the production of industrial chips. The research results show that MPP under certain conditions has a significant influence on the microstructure of all studied steel samples. A finely dispersed, homogeneous layer depth from 50 to 250 μm with high microhardness appears on the surface of the samples. The optimal processing modes are identified for different kinds of steel.

Key words: steel samples; magnetic-pulse processing; microstructure; microhardness; processing modes.

Fig. 11. Ref.: 5 titles.

Введение. Технологическую щепу в рубильных машинах получают в результате резания древесины рубильными ножами в продольно-торцово-поперечном, продольно-торцовом, поперечно-торцовом и других направлениях. Получаемые древесные частицы (щепы) имеют сравнительно большую

толщину (до 10 мм), поэтому такой способ резания получил название «рубка щепы», а применяемое для этой цели оборудование — рубительные машины. Поскольку в Республике Беларусь и России используют большое количество (более 60) разнообразных рубительных машин, аналогичных по выполняемым функциям, ножи для них отличаются как по конструкции, так и по материалу, из которого их изготавливают.

В барабанных рубительных машинах применяются ножевые валы барабанного типа, сменной режущей частью которых являются плоские ножи. Конструкция ножей, их размеры и величины углов зависят от конструкции барабанных ножевых валов, на которых ножи крепятся при помощи различных конструкций. Конструкция барабанных ножевых валов и их размеры в основном предопределяются конструкцией и назначением машины и различаются по форме, числу ножей и способам их крепления. Барабанный ножевой вал изготавливается чаще составным или сборным с цапфами для подшипников. При замене ножей вал со станка не снимается.

Ножи рубительных машин имеют прямоугольную форму, режущая кромка различной длины расположена по меньшей стороне прямоугольника, причём ножи с меньшей длиной используют при переработке крупномерной древесины, а с большей — при переработке кусковых отходов.

Под воздействием напряжений на поверхности или в объёме ножей могут появляться микро- и даже макротрещины, в результате чего ножи становятся непригодными к эксплуатации ещё до установки в рабочий барабан.

Анализ номенклатуры ножей для рубительных машин показал, что конструкция и типоразмеры ножей напрямую зависят от используемого оборудования. Габаритные размеры ($L \times H \times S$) сильно колеблются: L составляет 40...930 мм, H — 40...360 мм, S — 4...25 мм. Количество ножей в комплекте достигает 82 шт. Виды крепежа на рабочем органе (барабане, диске) определяют конструктивные особенности ножа (отверстия, режущие кромки). Твёрдость режущей кромки различных ножей колеблется и должна составлять HRC 54...60.

При производстве ножей для рубки, дробления древесных отходов и других материалов применяются стали, обладающие как высокой твёрдостью, так и высокой вязкостью для предотвращения скалывания и поломки ножа при ударных нагрузках. Для изготовления ножей рубительных машин в России используется качественная сталь [1]; легированная инструментальная сталь [2] глубокой прокаливаемости, сталь для штампового инструмента, для ударного инструмента и шарикоподшипниковая сталь. Формоустойчивость, твёрдость, вязкость и теплостойкость высоколегированных и высококачественных сталей при соответствующей термообработке обеспечивается введением определённых легирующих элементов: хром (Х), кремний (С), марганец (Г), молибден (М), ванадий (Ф) и других с общим содержанием легирующих элементов свыше 5,5%. Окончательные свойства стали определяются совместным действием всех легирующих элементов.

Твёрдость является важнейшей характеристикой инструментальных сталей, однако при изготовлении режущего инструмента не всегда следует добиваться её очень высоких значений, поскольку при росте твёрдости зачастую снижаются прочность и вязкость металла. При высокой вязкости в сочетании с высокой прочностью предупреждается образование сколов (выкрашивание) и трещин. На вязкость сталей, помимо термообработки, существенно изменяющей структуру, значительное влияние оказывает технология изготовления, а также способ выплавки и горячего деформирования. Стали, не обладающие достаточной вязкостью, нельзя использовать для изготовления инструмента, работающего при значительных динамических нагрузках (например, при рубке мёрзлой древесины).

Из вышесказанного следует, что вопросы разработки эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик рубильных ножей имеют большую актуальность и востребованность.

В Государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» развивается новое для Республики Беларусь научное направление: упрочняющая магнитно-импульсная обработка стальных изделий. Полученные результаты исследований позволили отработать такие режимы МИО, благодаря которым стойкость дереворежущих фрезерных ножей повышается от 1,5 до 3,0 раз [3]. Результатами работы заинтересовались некоторые российские фирмы. В частности, ООО «Инпласт» (Волгодонск) предложило провести исследования влияния режимов МИО на микротвёрдость и микроструктуру сталей, которые применяются этой фирмой для изготовления

рубильных ножей, используемых при производстве технологической щепы из древесных материалов. Большие ударные нагрузки и неоднородность свойств древесины приводят к быстрому затуплению режущих кромок рубильных ножей.

Увеличение периода стойкости ножей в 1,5 и более раз за счёт их упрочнения методом МИО позволит значительно снизить расходы на инструмент и повысить рентабельность производства.

Основная часть. Оборудование, приборы и образцы, применяемые в работе. Для осуществления упрочняющей МИО образцов использовали модернизированную магнитно-импульсную установку МИУ, изготовленную в лаборатории механофизики формирования гетерогенных систем (МФГС) Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси, которая позволяет получать энергию импульса до 15 кДж (рисунок 1).

При обработке изделий на МИУ рабочие инструменты установки — разрядник и индуктор — подвергаются очень большим нагрузкам, что вызывает нагрев обмотки и всего индуктора. При длительной работе нагрев индуктора превышает допустимые пределы, что может привести к выходу из строя индуктора и всей установки. Модернизация МИУ включает разработку систем охлаждения разрядника и индуктора, а также специальной оснастки для фиксации образцов и изделий.



Рисунок 1. — Модернизированная магнитно-импульсная установка

Для подключения импульсного высоковольтного источника питания к нагрузке в МИУ используется разрядник вакуумный управляемый типа РВУ-57. Для достижения максимального срока службы в процессе работы разрядник не должен нагреваться выше 40°C, поэтому для него была разработана и изготовлена система охлаждения, обеспечивающая отвод тепла. При разработке системы охлаждения необходимо было учесть высокое напряжение на электродах разрядника до 13 кВ и то, что через разрядник проходят импульсы тока до 100 кА, поэтому применялась воздушная система охлаждения. Также был выбран повторно-циклический режим работы системы охлаждения, который состоит в том, что во время заряда накопительной батареи конденсаторов и разряда через индуктор питающее напряжение с системы охлаждения снимается для исключения повреждения вентилятора во время мощных высоковольтных импульсов тока. Конструктивно разрядник и система охлаждения с разрядником изготовлены в виде отдельного блока, причём вентилятор жёстко зафиксирован относительно разрядника.

Система охлаждения индуктора обеспечивает охлаждение преимущественно обмотки индуктора в рабочей зоне (акт модернизации МИУ от 21.12.2015). Система охлаждения индуктора выполнена съёмной, в случае необходимости её можно отсоединить от индуктора (при невысокой интенсивности работы и при работе с длинномерными изделиями). Она работает от питающего напряжения 220 В частотой 50 Гц. Производительность системы порядка 160 м³ / ч.

Микротвёрдость стальных образцов измеряли с помощью прибора ПМТ-3. Микроструктурный анализ проводили на металлографическом комплексе МГК-2М1. Выявление структуры (травление) проводили 5%-м раствором HNO₃ в спирте.

Из ножей производства ООО «Инпласт» (сталь 60С2А, 65Г, 60С2ХФА, 6ХВ2С и 6ХС) были изготовлены образцы размерами 12 × 12 × 5 мм, причём часть образцов (по 8 шт. для каждого вида стали) оставалась в закалённом состоянии, а другая часть (по 8 шт.) — в отпущенном состоянии (у закалённых образцов твёрдость находилась в интервале 52...56 HRC, у отпущенных — 11...18 HRC).

Все образцы были промаркированы, разбиты на группы, которые обрабатывали по пяти различным режимам МИО с энергией импульса 2, 4, 6, 8 и 10 кДж.

На графиках (рисунки 2, 4, 6, 8, 10) для каждой марки стали показано изменение микротвёрдости образцов (а не сама микротвёрдость) относительно необработанных образцов в зависимости от режима обработки (образцы 1—5).

По результатам исследований микроструктуры следует отметить, что влияние МИО на все исследуемые образцы из различных сталей выражается практически одинаково с небольшими изменениями, независимо от структурного состояния стали (закалённый, отпущенный). Рассмотрим представленные микроструктуры исследуемых образцов сталей до и после обработки (рисунки 3, 5, 7, 9, 11). Все микроструктуры после МИО заметно отличаются наличием упрочнённых слоёв и появлением тёмных фазовых включений, что может свидетельствовать о наличии в стали каких-то примесей, которые активизировались под влиянием магнитного поля.

Сталь 60С2А. Видно (см. рисунок 2), что для стали 60С2А при обработке по режиму № 3 наблюдается заметное увеличение микротвёрдости для закалённых образцов. Микротвёрдость отпущенных образцов после МИО изменяется в пределах погрешности.

Показаны микроструктуры образцов стали 60С2А до (см. рисунок 3, а) и после МИО (см. рисунок 3, б и в). На всех образцах после МИО виден светлый поверхностный слой, который трудно травится вследствие его повышенной плотности, из чего можно сделать вывод о его упрочнении. Глубина слоя составляет от 50 до 150 мкм. Результаты исследований показывают, что оптимальным режимом для закалённой стали 60С2А является режим № 3.

Сталь 65Г. Из графика (см. рисунок 4) видно, что для стали 65Г при обработке по режиму № 3 наблюдается небольшое увеличение микротвёрдости для закалённых образцов, а при остальных режимах обработки микротвёрдость даже уменьшается. Похожая картина наблюдается и для незакалённых образцов.

Показаны микроструктуры образцов стали 65Г до (см. рисунок 5, а) и после МИО (см. рисунок 5, б—г). На всех образцах после МИО также виден светлый поверхностный слой: на закалённых образцах средняя толщина слоя составляет около 80 мкм, а на незакалённых — 250 мкм.

Результаты исследований показывают, что оптимальными режимами для закалённой стали 65Г являются режимы № 3 и № 4.

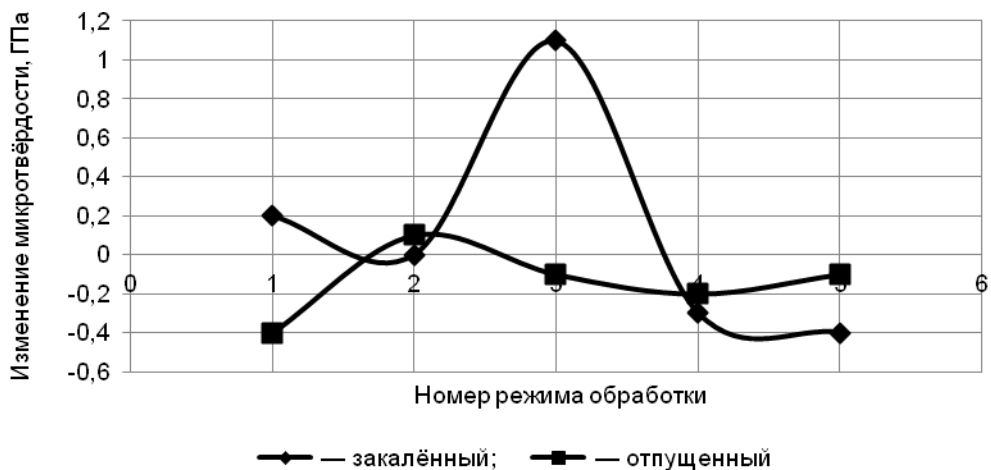
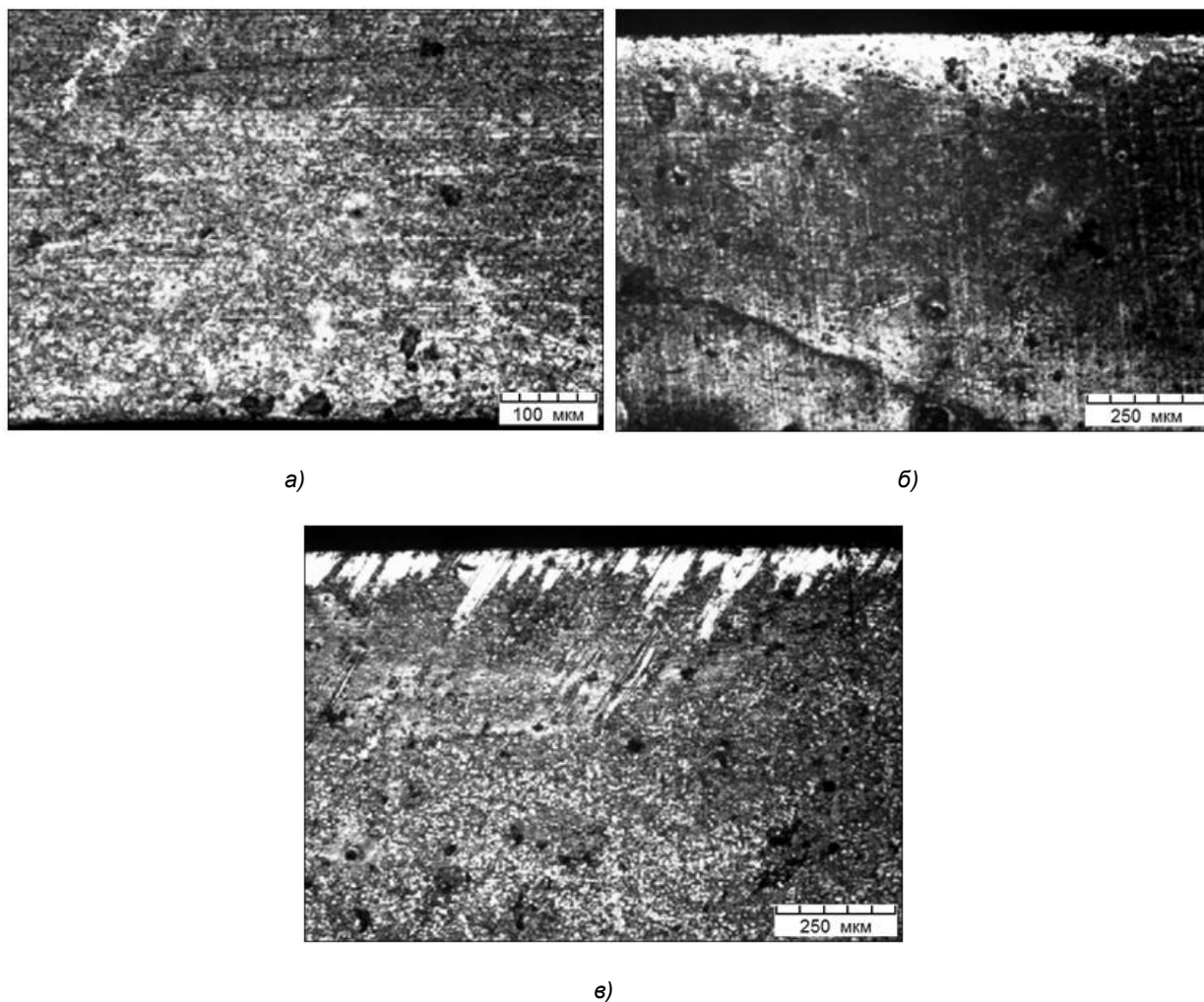


Рисунок 2. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 60С2А после МИО от режима обработки



а — шлиф до обработки; б — закалённый шлиф (режим № 3); в — незакалённый шлиф (режим № 3)

Рисунок 3. — Микроструктуры образцов стали 60С2А до и после МИО при различных режимах

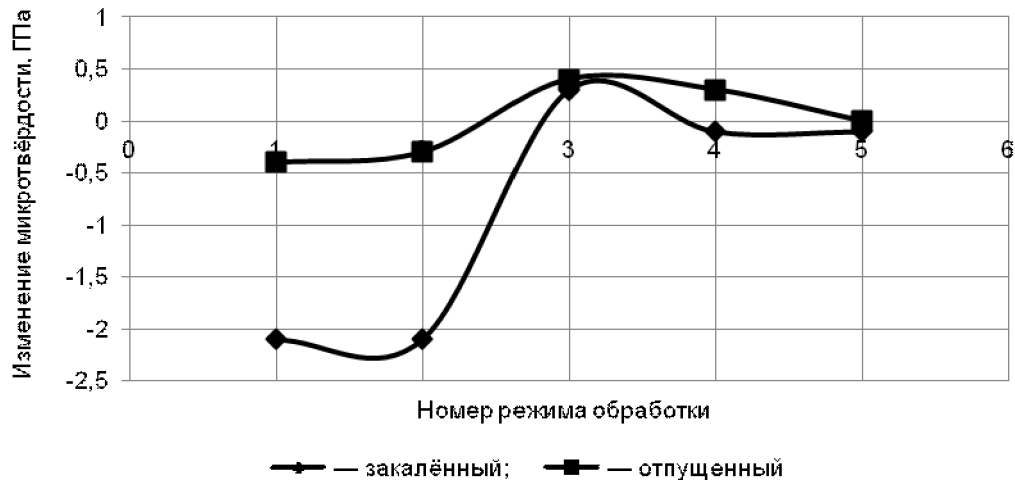
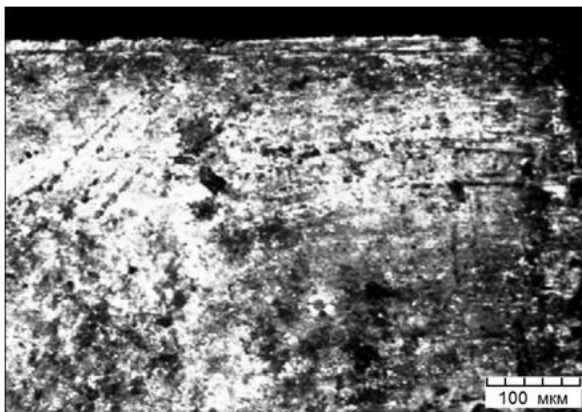
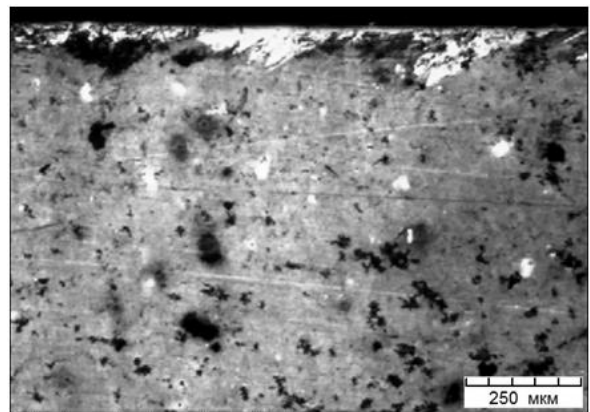


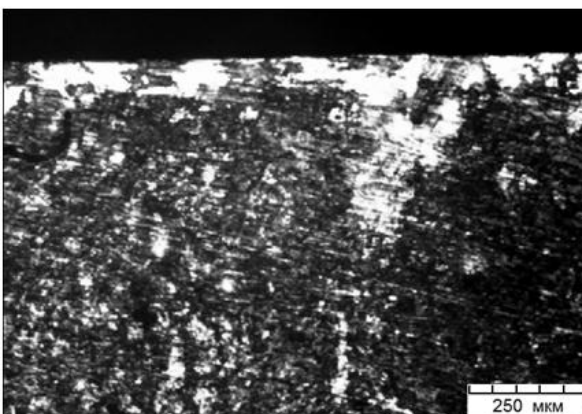
Рисунок 4. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 65Г после МИО от режима обработки



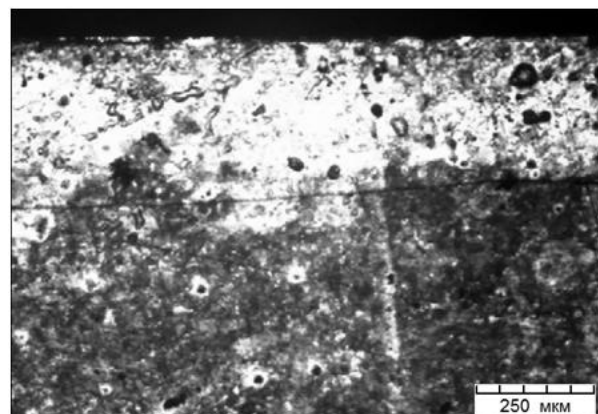
а)



б)



в)



г)

а — до обработки; б — закалённый образец (режим № 4); в — закалённый образец (режим № 5); г — незакалённый образец (режим № 4)

Рисунок 5. — Микроструктуры образцов стали 65Г до и после МИО при различных режимах

Сталь 60С2ХФА. Из графика (см. рисунок 6) видно, что для стали 60С2ХФА при обработке по режимам № 2 и № 4 наблюдается небольшое увеличение микротвёрдости для закалённых образцов, а по режимам № 3 и № 5 — снижение. Микротвёрдость отпущенных образцов после МИО несколько повышается при режиме № 4, а при остальных либо не меняется, либо несколько уменьшается.

Показаны микроструктуры закалённых образцов стали 60С2ХФА до (см. рисунок 7, а) и после МИО (см. рисунок 7, б—г). На всех обработанных образцах также видны упрочнённые поверхностные слои: на рисунке 7, б, — слой тёмного цвета, мелкодисперсный, глубиной от 70 до 100 мкм, а на рисунке 7, в и г, — слои светлого цвета глубиной от 50 до 80 мкм. Результаты исследований показывают, что оптимальными режимами упрочнения для закалённой стали 60С2ХФА являются режимы № 2 и № 4.

Сталь 60ХВ2С. Из графика (см. рисунок 8) видно, что для стали 60ХВ2С при обработке по режиму № 3 наблюдается небольшое увеличение микротвёрдости для закалённых образцов, а при остальных режимах микротвёрдость даже уменьшается. Микротвёрдость отпущенных образцов после МИО немного увеличивается при режимах № 2, № 3 и № 5, при режиме № 4 не изменяется, а при режиме № 1 заметно уменьшается.

Показаны микроструктуры образцов стали 60ХВ2С до (см. рисунок 9, а) и после МИО (см. рисунок 9, б и в). На всех обработанных образцах также видны упрочнённые поверхностные слои: для закалённых образцов — это тёмные слои с мелкодисперсной структурой глубиной от 50 до 70 мкм (см. рисунок 9, б), а для незакалённых образцов — слой переменной светло-тёмной окраски глубиной около 50 мкм. Результаты исследований показывают, что оптимальным режимом для закалённой стали 60ХВ2С является режим № 3.

Сталь 6ХС. Из графика (см. рисунок 10) видно, что для стали 6ХС при обработке по режиму № 3 наблюдается небольшое увеличение микротвёрдости для закалённых образцов, а при остальных режимах микротвёрдость или практически не изменяется (режимы № 4 и № 5), или заметно уменьшается (режимы № 1 и № 2). Микротвёрдость отпущенных образцов после МИО несколько увеличивается при режимах № 3 и № 4, или немного уменьшается при режимах № 1 и № 2.

Показаны микроструктуры образцов стали 6ХС до (см. рисунок 11, а) и после МИО (см. рисунок 11, б и в). На всех образцах после МИО образуются упрочнённые слои: на закалённом образце (см. рисунок 11, б) слой имеет неровный характер и глубину от 60 до 100 мкм, а на незакалённом образце образовался текстурированный слой толщиной около 250 мкм.

Результаты исследований показывают, что оптимальным режимом для закалённой стали 6ХС является режим № 3.

Если обобщить результаты изменений значений микротвёрдости поверхности образцов после МИО, то можно утверждать, что лучшим (оптимальным) режимом является режим № 3, после него практи-

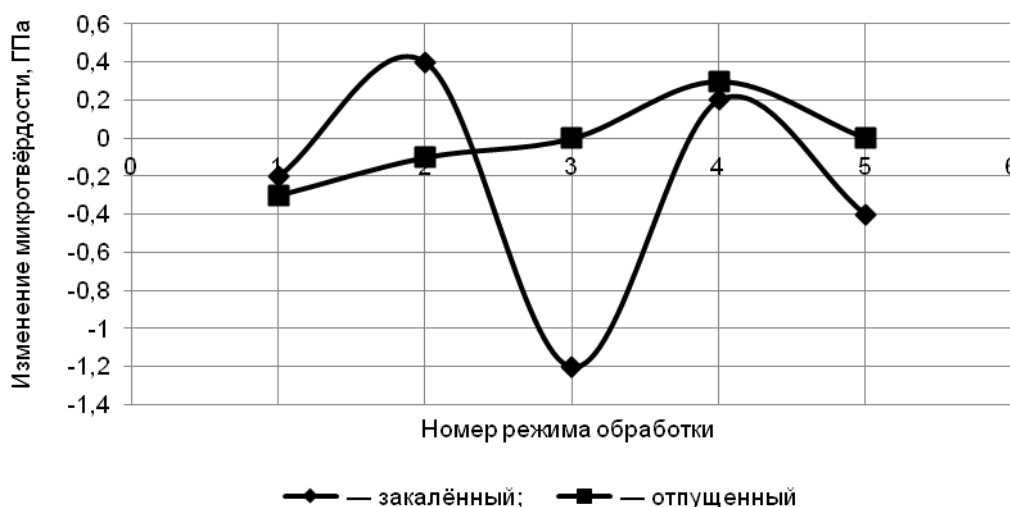


Рисунок 6. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 60С2ХФА после МИО от режима обработки

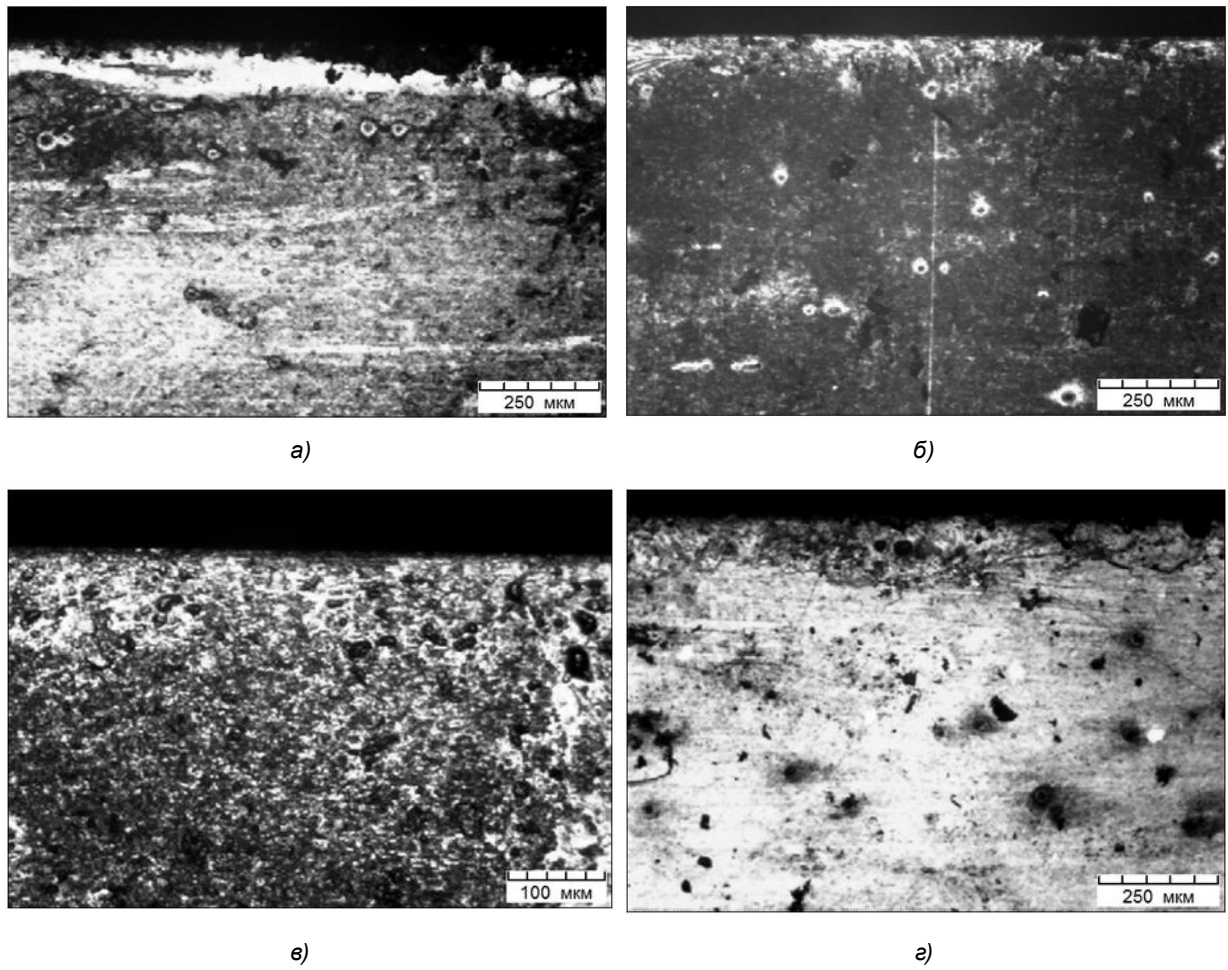


Рисунок 7. — Микроструктуры закалённых образцов стали 60С2ХФА до (а) и после МИО при режимах № 2 (б), № 3 (в) и № 4 (г)

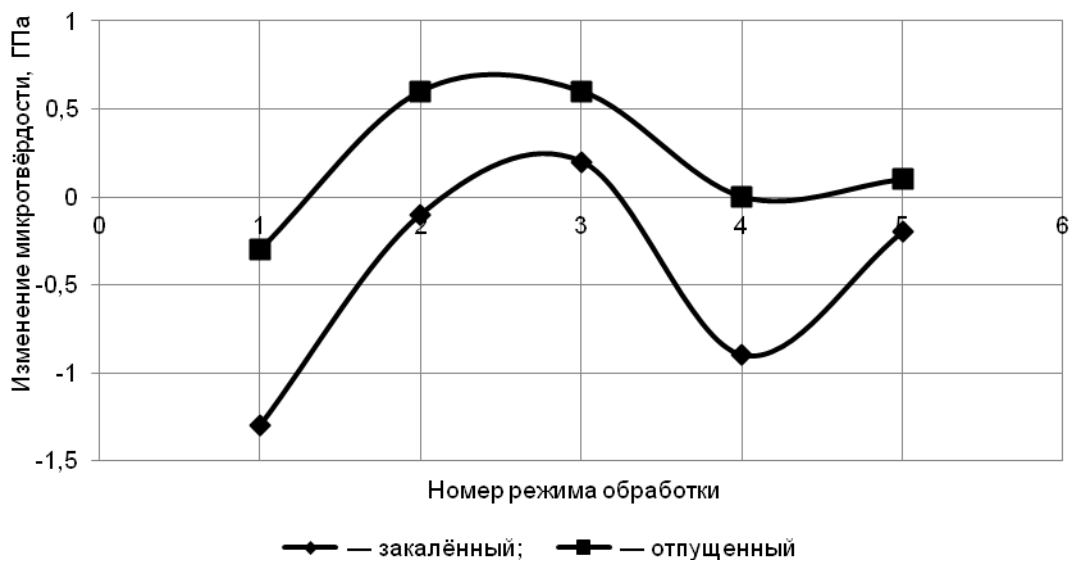
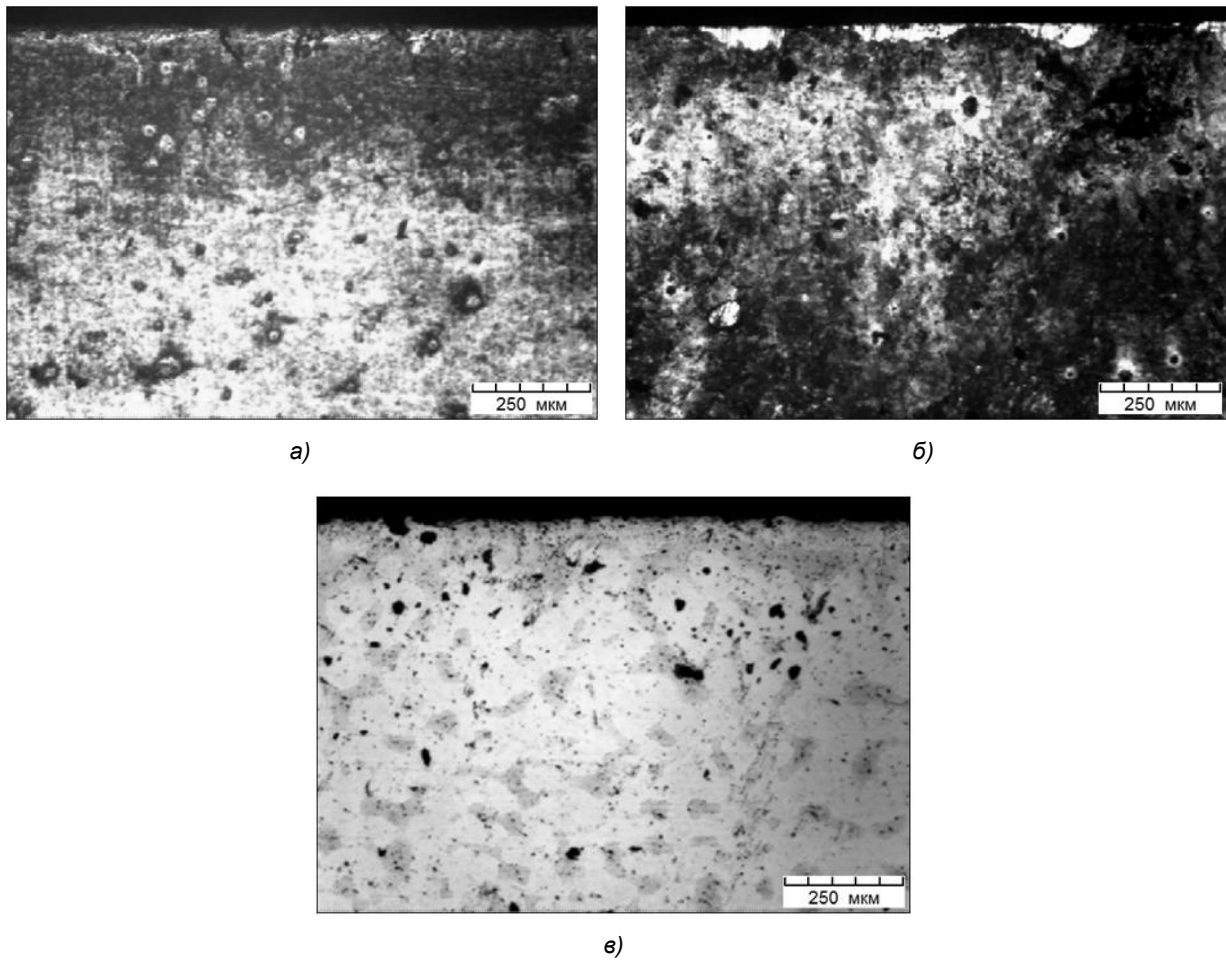


Рисунок 8. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 60ХВ2С после МИО от режима обработки



а — нетравленный образец до МИО; б — закалённый травленный образец при режиме № 3;
 в — незакалённый травленный образец при режиме № 4

Рисунок 9. — Микроструктуры образцов стали 6ХВ2С до и после МИО

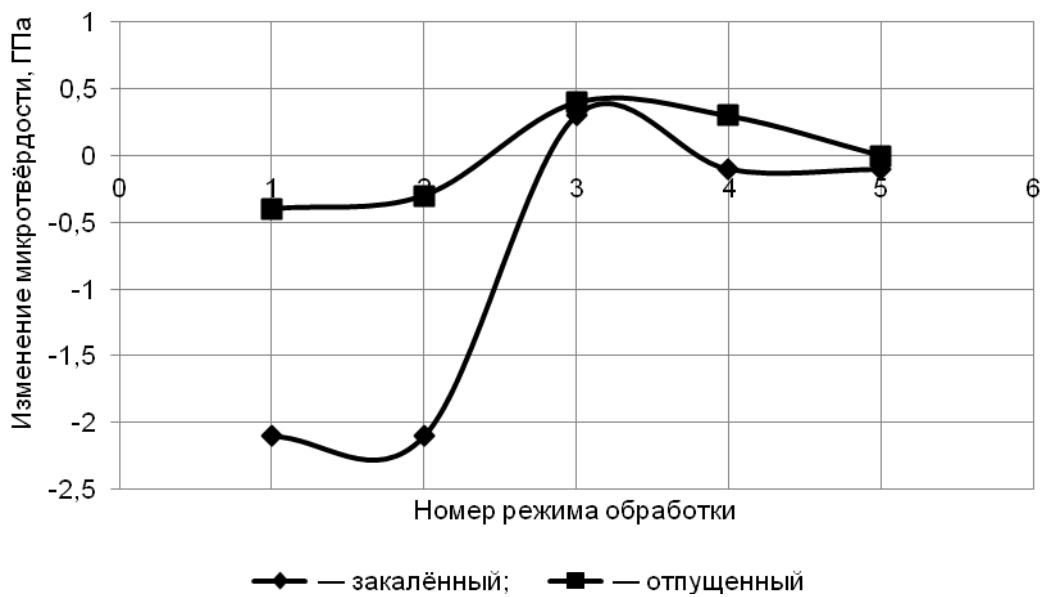
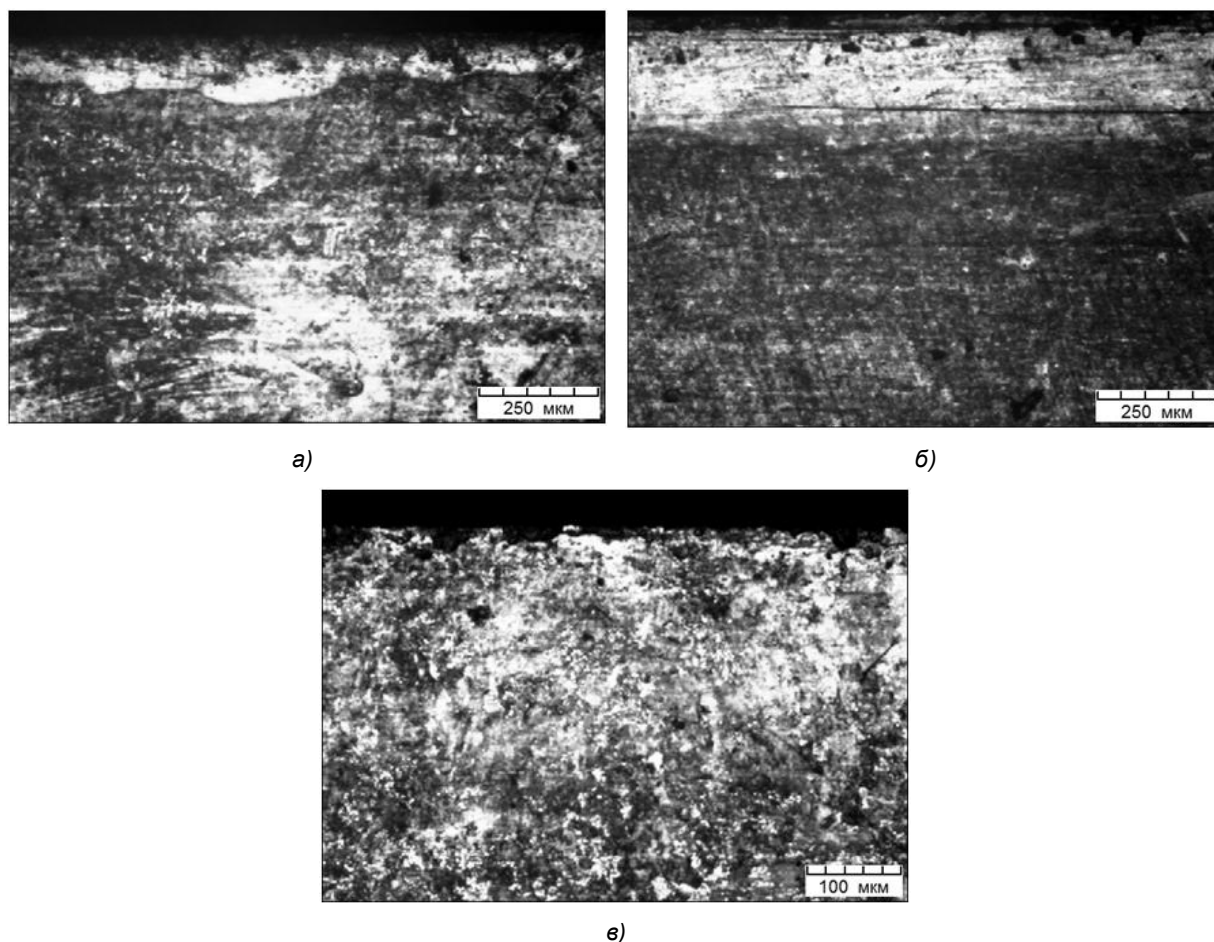


Рисунок 10. — Зависимость изменения микротвёрдости образцов из стали 6ХС после МИО от режима обработки



а — образец до МИО; б — закалённый образец; в — незакалённый образец

Рисунок 11. — Микроструктуры образцов стали 6ХС до и после МИО при режиме № 3

чески на всех образцах микротвёрдость несколько повышается. После режима МИО № 4 на некоторых образцах микротвёрдость не изменяется или несколько повышается. Во всех остальных режимах микротвёрдость снижается.

Заключение. Влияние МИО на микроструктуру выражается следующим образом:

- 1) после травления на обрабатываемой поверхности видно образование явно выраженного мелкодисперсного слоя глубиной до 250 мкм. Этот слой плохо травится, так как имеет большую плотность. Именно он и позволяет значительно повысить прочностные и износостойкие свойства стальных изделий;
- 2) для разных сталей упрочнённые слои имеют различный вид: светлый или тёмный, с выраженной мелкодисперсной структурой или текстурированные, глубина изменяется от 50 до 250 мкм;
- 3) минимальная глубина упрочнённого слоя, полученного после МИО образцов из различных сталей, составляет для закалённых образцов не менее 50 мкм;
- 4) выбор режимов МИО зависит от состава и процентного содержания легирующих элементов, углерода и других факторов.

Для подтверждения результатов исследований предполагается упрочнить методом МИО опытные партии рубильных ножей, изготовленных из исследованных сталей (с использованием рекомендованных режимов обработки), и провести их производственные испытания.

Список цитируемых источников

1. Прутки, полосы и мотки из нелегированной стали. Общие технические условия : ГОСТ 1435-99. Введ. 01.09.2001. Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. 21 с.
2. Прутки, полосы и мотки из инструментальной стали. Общие технические условия : ГОСТ 5950-2000. Введ. 01.01.2002. Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. 40 с.
3. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // *Литьё и металлургия*. 2012. № 3. С. 77—83 ; Алифанов А. В., Попова Ж. А., Ционенко Н. М. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле // *Литьё и металлургия*. 2012. № 4. С. 151—155 ; Поверхностная упрочняющая обработка стальных изделий импульсным электромагнитным полем / А. В. Алифанов [и др.] // 14-th International Scientific Conference “TRASFER 2013” / Alexander Dubcek University of Trencin (Slovakija), 16—17.10.2013. Trencin. P. 20—25.

Поступила в редакцию 31.05.2016.