



УДК.621.74

Поступила 14.01.2016

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОГО ИНСТРУМЕНТА ГОРЯЧЕЙ ВЫСАДКИ ГОЛОВОК БОЛТОВ

METHODS OF INCREASING THE RESISTANCE OF A HEAVILY HOT TOOL LANDING BOLT HEADS

В. Н. ФЕДУЛОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Тел. моб. +375(29)631-09-85.

V. N. FEDOULOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. Tel. +375(29)631-09-85.

Настоящее исследование посвящено повышению стойкости высоконагруженного инструмента для высадки головки болтов диаметром 8 и 10 мм с шестигранной потайной головкой посредством оптимизации режима термического упрочнения при использовании ковкнокатаной заготовки стали ДИ23 при его производстве.

The present study focuses on increasing resistance of highly-loaded instrument (in particular, punches) for stud driving head diameter of 8 mm and 10 mm countersunk hex through the optimization of heat hardening process using a forged-rolled steel billet DI23 in its production.

Ключевые слова. Горячая штамповка. Стойкость. Инструментальная сталь 5ХЗВ3МФС. Оптимальная термическая обработка. Твердость.

Keywords. Hot forming. Resistance. Tool steel. The chemical compositions 5H3W3MVS. Thermal treatment. Hardness.

Жесткое температурно-силовое воздействие в процессе эксплуатации, как правило, испытывают рабочие части штампов горячего объемного деформирования [1]. Наиболее экстремальные условия испытывает инструмент горячего формообразования при изготовлении точных штамповок на прессах, например, особенно при высадке шестигранной потайной головки у болтов диаметром 8 и 10 мм из стали 45. Работа в условиях замедленного нагружения приводит к длительному контакту с горячей заготовкой и значительному разогреву рабочей поверхности инструмента, в частности пуансонов (рис. 1) для формирования соответственно головки болтов диаметрами 13 и 16 мм и шестигранного отверстия 6 и 8 мм в них.

Средняя температура поверхностных слоев такого инструмента в рабочей зоне может повышаться при эксплуатации до 680–700 °С, тогда как основная его часть остается прогретой до 20–400 °С. Контактные поверхности пуансонов толщиной до нескольких микронов в этом случае могут разогреваться



Рис. 1. Общий вид пуансона для горячей высадки потайной шестигранной головки для болтов из стали 45 диаметром 10 мм, заготовки для его производства и готового болта

и до 800 °С в зависимости от температуры нагрева заготовки. Одновременное наложение силовых и термических напряжений для получения нужной конфигурации поковки (рис. 2) в условиях получения точной формы от требуемой заготовки способствует возникновению в теле инструмента сложноподвижного состояния. Наличие градиентов температуры по сечению инструмента и циклический характер одновременного теплового и силового воздействия (развитие пластической деформации в малых объемах) вызывают значительный рост скорости диффузионных процессов и ускоряют тепловое разупрочнение материала инструмента.



Рис. 2. Общий вид поковки для изготовления болта с головкой диаметром 16 мм и рабочим телом 10 мм



Рис. 3. Общий вид пуансона при окончании эксплуатации: «плыл контур рабочей части»

Со временем это приводит к быстрому выходу рабочей зоны пуансона или его отдельной части из строя за счет высоких удельных давлений и температурного воздействия (рис. 3). Сталь ДИ23 для такого инструмента в условиях действующего производства упрочняется проведением рекомендованного в литературе режима термической обработки: закалка с температуры 1140 °С в масле и последующий отпуск при температуре 650 °С. Теплостойкость этой стали указана как 680–690 °С в зависимости от ее химического состава, когда ее твердость составляет примерно 45 HRC [2]. Результаты по стойкости пуансонов при использовании рекомендованного режима их упрочнения приведены в таблице (п. 1 и 7). Они являются неудовлетворительными: стойкость пуансонов для формовки головки диаметром 13 мм с шестигранным отверстием 6 мм болта диаметром 8 мм составляет от 106 до 118 шт. поковок, а для болта диаметром 10 мм с головкой диаметром 16 мм и шестигранным отверстием 8 мм – 150–200 шт. Указанный случай можно отнести с полной уверенностью к тематике исследования высоконагруженного инструмента. К тому же этот процесс является наиболее оперативным способом определения уровня износостойкости сталей: установление стойкости пуансонов как наиболее нагруженной части инструмента для формирования головки с потайным шестигранным отверстием. В данном случае характерно также использование минимального количества по массе заготовок инструментальных сталей, т. е. сокращение расходов на проведение экспериментов, в том числе и на механическую обработку, а также значительное сокращение времени на все исследование.

Целью настоящего исследования является повышение стойкости высоконагруженного инструмента (пуансонов) при формировании головки соответственно диаметром 13 и 16 мм для болтов диаметром 8 и 10 мм с шестигранным потайным отверстием 6 и 8 мм посредством оптимизации режима термического упрочнения при использовании кованокатаной заготовки стали ДИ23 при его производстве.

Методическая часть исследования состояла в изготовлении вышеуказанных пуансонов из проката диаметром 42 мм стали ДИ23 и упрочнения с использованием нагрева при закалке в соляной ванне до температуры 1140–1250 °С, охлаждения в масле и отпуска при температуре 650–690 °С. Предметом исследования также являлось определение структуры стали и твердости. Твердость определяли с использованием стандартной методики: по Роквеллу, ГОСТ 9013, после шлифовки металла на глубину не менее 0,5 мм. При исследовании микроструктуры травление осуществляли реактивом: 4%-ный раствор HNO₃ в спирте. Съемку проводили при увеличениях от 500 до 1500 крат.

Известно [3], что выбор марки стали и оптимизация режимов ее термической обработки для любого инструмента является одним из главных моментов в его успешной эксплуатации. Особенности структуры в состоянии после закалки с температуры 1140 °С и отпуска при температуре 650 °С (рис. 4) проката стали ДИ23 и выход из строя при эксплуатации пуансонов по причине смятия формирующего контура говорят о неиспользовании возможностей стали в полном объеме. После указанной термической обработ-

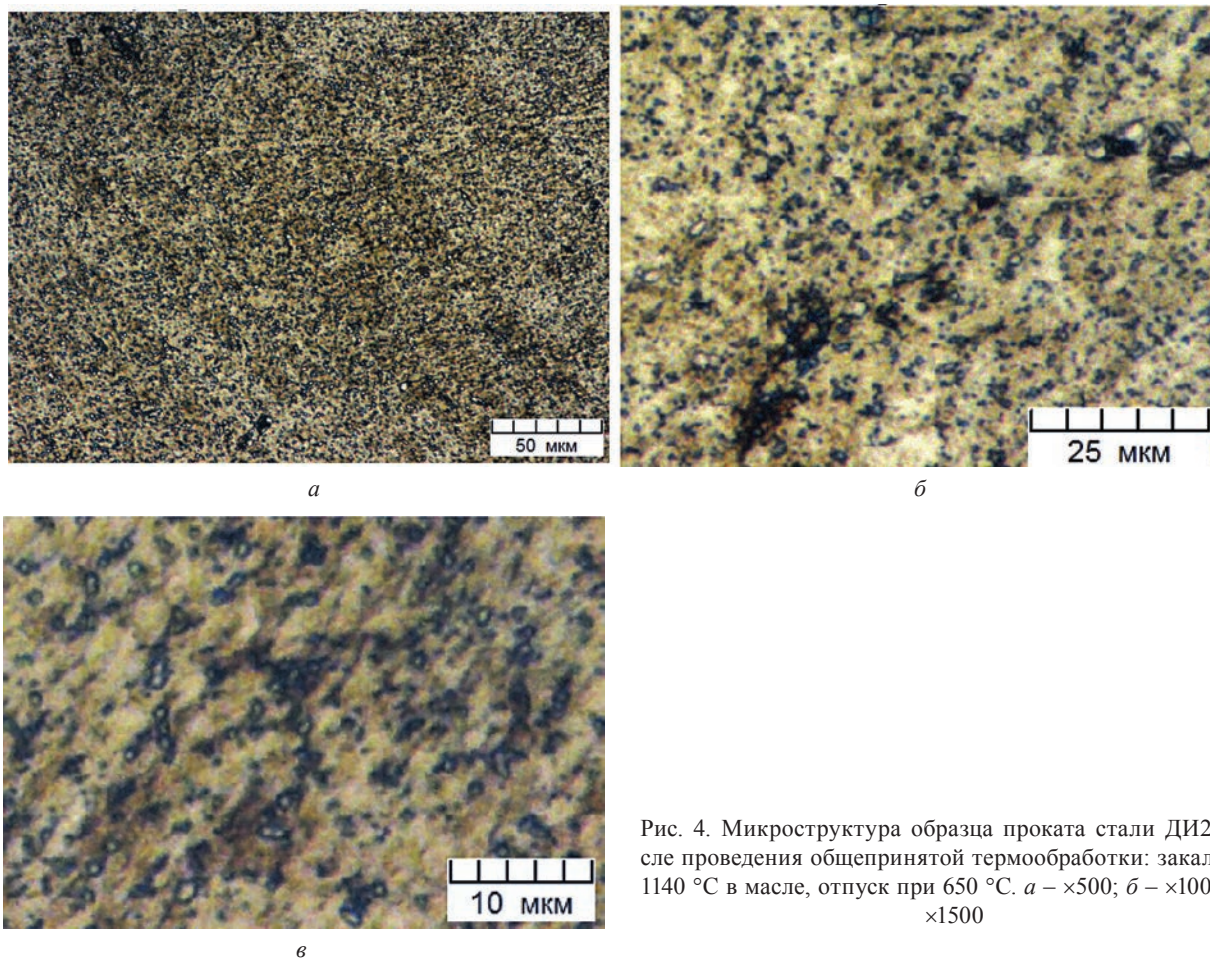


Рис. 4. Микроструктура образца проката стали ДИ23 после проведения общепринятой термообработки: закалка от 1140 °С в масле, отпуск при 650 °С. *а* – $\times 500$; *б* – $\times 1000$; *в* – $\times 1500$

ки микроструктура образца стали представлена большим количеством карбидов, как минимум двух видов $M_{23}C_6$ и M_6C (рис. 4), распределенных в матричном сегменте. Границы бывшего зерна аустенита не выявляются. Структура матрицы – мартенсит отпуска, строение которого даже при увеличении 1500, то же не выявляется. Попытка выявить зерно с помощью домислов, глазиков оператора и вариаций программы в первом варианте показала, что наибольшее количество зерен отвечает площади 100–250 $\mu\text{м}^2$ (рис. 5). Максимальное количество зерен соответствует среднему размеру 5–15 $\mu\text{м}$. Микроструктура упрочненной стали и ее химический состав показали, что возможность повышения износостойкости стали необходимо добиваться за счет увеличения температуры нагрева при закалке и отпуске.

В работе [2] было показано, что после закалки с температуры 1130–1150 °С в масле и отпуска при температуре 650 °С деформированная сталь ДИ23 имеет достаточно высокое значение пластичности, но для операции высадки головки с шестигранным отверстием, как оказалось, – пониженную теплостойкость. При производстве пуансонов, подобных нашему типу, из деформированной заготовки (пруток диаметром 42–50 мм) и при упомянутом режиме упрочнения с использованием нагрева под закалку в соляных ваннах наблюдали достаточно высокую твердость (порядка 50–52 HRC). Во время эксплуатации, как уже отмечалось, стойкость инструмента оказалась не высокой, а характер разрушения при его выходе из строя показал наличие запаса пластичности и пониженной теплостойкости стали ДИ23 (см. таблицу, п. 1 и 7) при высадке головок для болтов диаметром 8 и 10 мм.

В начале исследования и при наличии высокой твердости на поверхности пуансонов допустили, что повышение стойкости инструмента можно обеспечить повышением температуры отпуска стали до 665 °С и проведением процесса карбонитрирования в обмазке. Результаты проведенных исследований приведены в таблице. Для пуансонов при высадке головок для болтов диаметром 10 мм добились значительного увеличения стойкости пуансонов: в 3 раза, хотя твердость оказалась на уровне 47–48 HRC (см. таблицу, п. 8). Эффект значительного повышения стойкости инструмента произошел, видимо, из-за проведения процесса карбонитрирования в обмазке, а разогрев рабочей поверхности на заключительном этапе эксплуатации находился в интервале температур, близких к 660 °С (для случая формовки головки болта диаметром 10 мм).

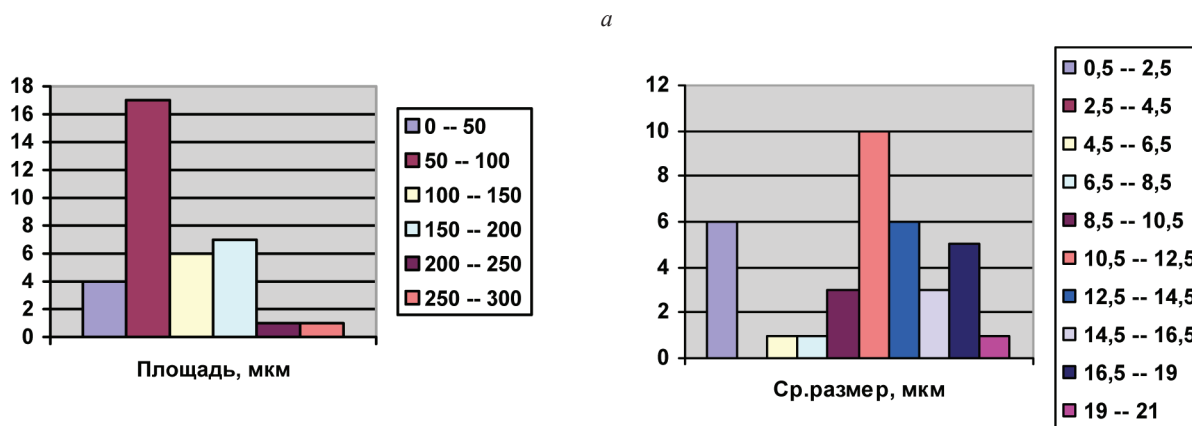
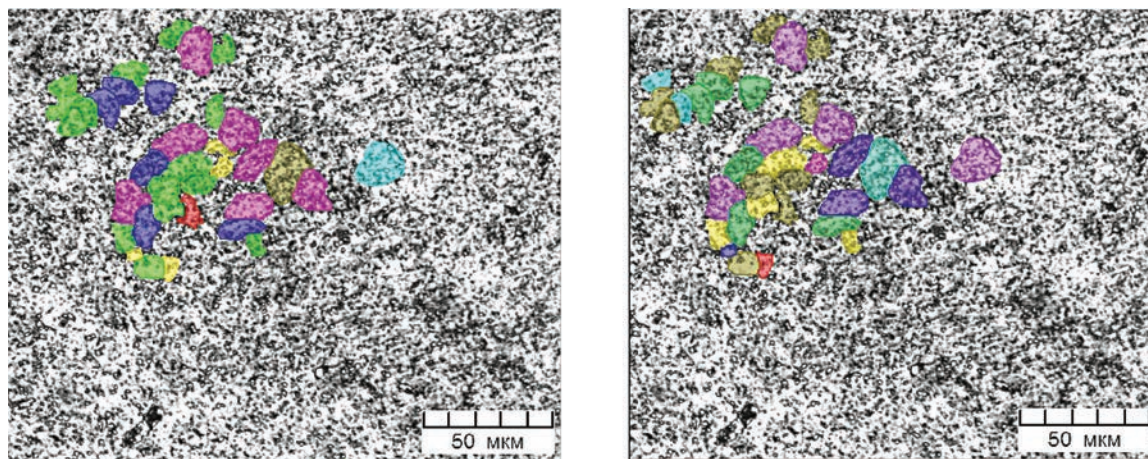


Рис. 5. Маски выделенных зерен (а) и гистограммы их распределения (б) согласно размерному классу по площади и среднему размеру для образца проката стали ДИ23 после закалки от 1140 °С в масле и отпуск 650 °С. а – ×500

Результаты эксплуатации пуансонов из стали ДИ23 при горячей высадке головки болтов из стали 45 с рабочим диаметром 8 и 10 мм

№ п. п.	Режим термической обработки	Твердость HRC	Стойкость, штук поковок	Примечание
<i>Для высадки болтов с диаметрами рабочей части 8 мм и головкой 13 мм (шестигранник 6 мм)</i>				
1	Закалка от 1140 °С в масле с предварительным подстуживанием на воздухе 1–2 мин, отпуск 650 °С, 1,5 ч	50–51	106–118	«Поплыл» контур рабочей части (рис. 3)
2	Закалка от 1140 °С в масле с предварительным подстуживанием на воздухе 1–2 мин, отпуск 665 °С, 1,5 ч	47–48	125–135	То же
3	Закалка от 1160 °С сразу в масле, отпуск 675 °С, 1,5 ч	50–51	180–220	Отрыв шестигранника со смятием контура
4	Закалка от 1200 °С в масле с предварительным подстуживанием 1–2 мин на воздухе, отпуск 675 °С, 1,5 ч	50–51	200–235	То же
5	Закалка от 1220 °С в масле с предварительным подстуживанием на воздухе 1–2 мин, отпуск 675 °С, 1,5 ч	50–51	155–160	Обрыв шестигранника (рис. 13, а)
6	Закалка от 1220 °С в масле, отпуск 680–690 °С, 1,5 ч	49–50	418–522	То же
<i>Для высадки болтов с диаметрами рабочей части 10 мм и головкой 16 мм (шестигранник 8 мм)</i>				
7	Закалка от 1140 °С в масле с предварительным подстуживанием 1–2 мин, отпуск 650 °С, 1,5 ч	52–53	150–200	По причине смятия рабочего контура (рис. 3)
8	Закалка от 1140 °С в масле с предварительным подстуживанием 1–2 мин, отпуск 665 °С, 1,5 ч + карбонитрирование в обмазке	47–48	570–625	То же
9	Закалка от 1200 °С в масле с предварительным подстуживанием 1–2 мин, отпуск 675 °С, 1,5 ч	48–49	1250–1315	То же

Для пуансонов с шестигранником под отверстие диаметром 6 мм (исходная заготовка для болтов диаметром 8 мм) разогрев рабочей части достигает более высоких температур, поэтому здесь эффект повышения стойкости оказался менее значительным (см. таблицу, п. 2). Учитывая также, что в составе стали ДИ23 [2] содержится большое количество легирующих элементов, автор пришел к идее повышения температуры нагрева под закалку и отпуск одновременно при производстве высоконагруженного инструмента из этой стали.

Согласно рекомендациям [3], в отдельных случаях можно при нагреве теплостойких инструментальных сталей под закалку допустить повышение температуры нагрева и обеспечить отклонение в сторону увеличения зерна для повышения их теплостойкости, но только для инструмента, работающего без динамических нагрузок. Однако уровень допустимого повышения температуры нагрева под закалку для таких сталей ранее не оговаривали. Это связано с тем, что, помимо роста зерна, повышение температуры нагрева под закалку может также вызвать у теплостойких сталей выделение вторичных карбидов по границам зерен при охлаждении во время закалки и приводить к значительной потере пластичности (к охрупчиванию) по мнению автора.

Начали с повышения температуры закалки до 1160 °С, так как необходимо было одновременно сохранить достаточную твердость при повышении температуры отпуска до 675 °С и обеспечить повышение износостойкости стали ДИ23 (см. таблицу, п. 3). Добились сохранения твердости на уровне 50–51 HRC и повысили стойкость до 180–220 шт. поковок для болтов диаметром 8 мм и шестигранным отверстием под ключ 6 мм. После закалки в масле от 1160 °С и отпуска при 675 °С в структуре, хотя и слабо, но начинает выявляться зерно. При этой температуре нагрева под закалку начался процесс роста аустенитного зерна. Он включает в себя растворение наименее устойчивых карбидов, повышение степени легирования матричного раствора основными легирующими элементами за счет этого растворения, появление и оформление в разной мере новых границ зерен. Во время проведения собственно закалки при охлаждении в масле из-за частичного растворения неустойчивых карбидов и повышения степени легирования аустенита увеличивается уровень упрочнения образовавшегося мартенсита закалки. Поэтому стало возможным и повысить температуру отпуска до 675 °С при сохранении твердости стали на достаточном уровне.

Структура внутри зерна после проведения полного цикла термической обработки – мартенсит отпуска (рис. 6, а). Мелкой карбидной фазы не много и она в матрице распределена неравномерно. Имеет место присутствие крупных карбидов (рис. 6, б). Площадь и средний размер зерен, согласно размерному классу, определяли при увеличении 500 (рис. 7). Максимальное количество зерен соответствует размеру от 10 до 25 мкм, а по площади – от 100 до 400 мкм².

Затем температуру нагрева в соляной ванне при закалке пуансонов для формовки головки болта диаметром 8 и 10 мм подняли до 1200–1220 °С (как для стали Р6М5), но сохранили подстуживание на воздухе перед охлаждением в масле. Возникший эффект более полного растворения легирующих элементов из карбидов при нагреве под закалку из-за повышения температуры нагрева еще на 40–60 °С, а в общей сложности на 60–80 °С от общепринятой сказался положительно.

Для пуансонов, обеспечивающих формирование головки болта диаметром 10 мм (рабочий шестигранник 8 мм), повышение температуры нагрева под закалку до 1200 °С (даже при подстуживании на воздухе перед охлаждением в масле) и отпуск при 675 °С, обеспечили рост стойкости еще в 2 раза (см. таблицу, п. 8 и 9). В случае формовки головки болта диаметром 8 мм такой режим термической обработки способствовал небольшому росту стойкости инструмента (см. таблицу, п. 4). Необходимая пластичность стали, судя по характеру разрушения пуансона, все еще сохранялась. Нагрев под закалку до 1200 °С (рис. 8), подстуживание на воздухе перед закалкой в масле и отпуск при 675 °С микроструктуру стали значительно изменили по сравнению с нагревом при 1160 °С. Границы зерен видны лучше, так как процесс формирования нового зерна прошел более полно по сравнению с нагревом при 1160 °С. Максимальное количество зерен имеет площадь 100–500 мкм², средний размер зерна при этом составляет до 10–50 мкм (рис. 9, 10). Начинается процесс выделения карбидов по границам зерен при закалке. Внутризеренная структура представлена все тем же не выявляющим своего строения мартенситом отпуска и карбидами.

Подстуживание на воздухе перед интенсивным охлаждением в масле с температуры закалки в масле с 1220 °С сыграло «злую шутку»: стойкость снизилась по сравнению с нагревом при закалке 1200 °С (см. таблицу, п. 5). Видимо, произошло охрупчивание стали по границам зерен больше, чем в первом случае, но механизм разрушения при эксплуатации резко не изменился. Подавить частично охрупчива-

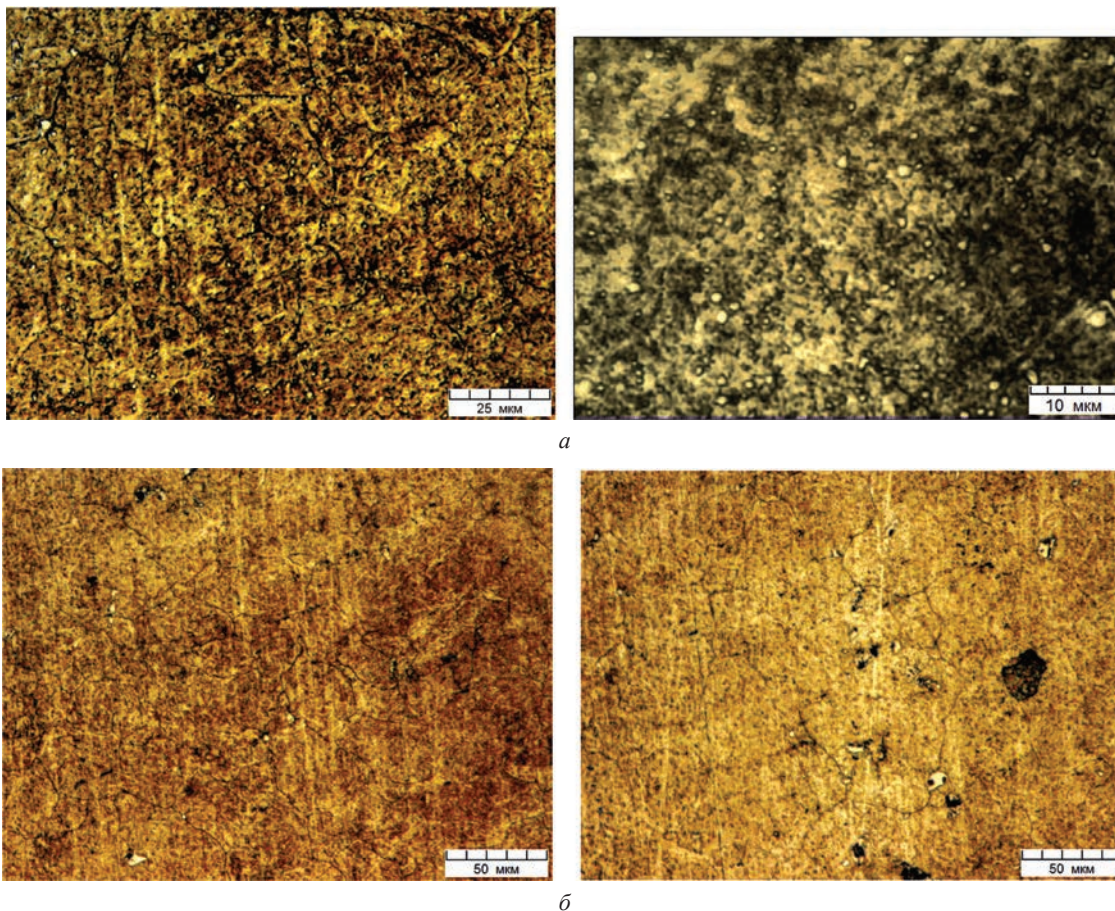


Рис. 6. Микроструктура образца проката стали ДИ23 после закалки от 1160 °С в масле и отпуска при 675 °С: а – $\times 1000$; б – $\times 500$

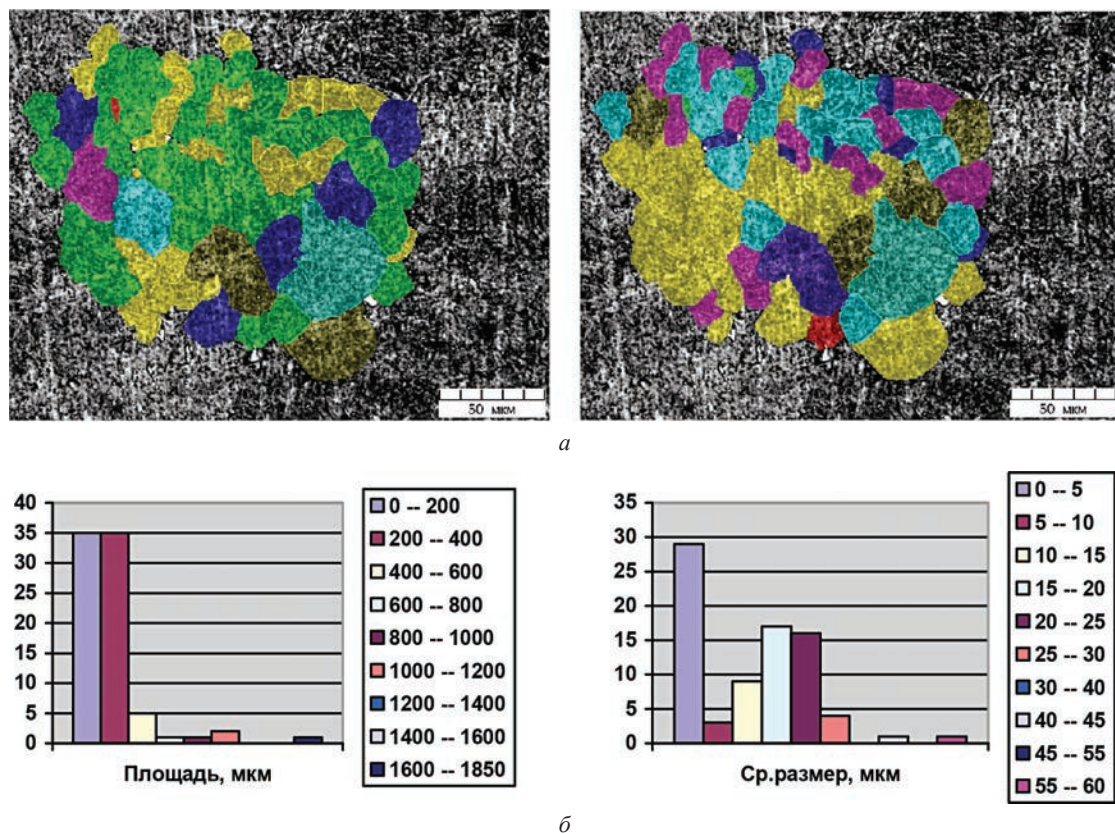


Рис. 7. Маски выделенных зерен (а) и гистограммы их распределения (б) согласно размерному классу по площади и среднему размеру для образца проката стали ДИ23 после закалки от 1160 °С в масле и отпуска при 675 °С. а – $\times 500$

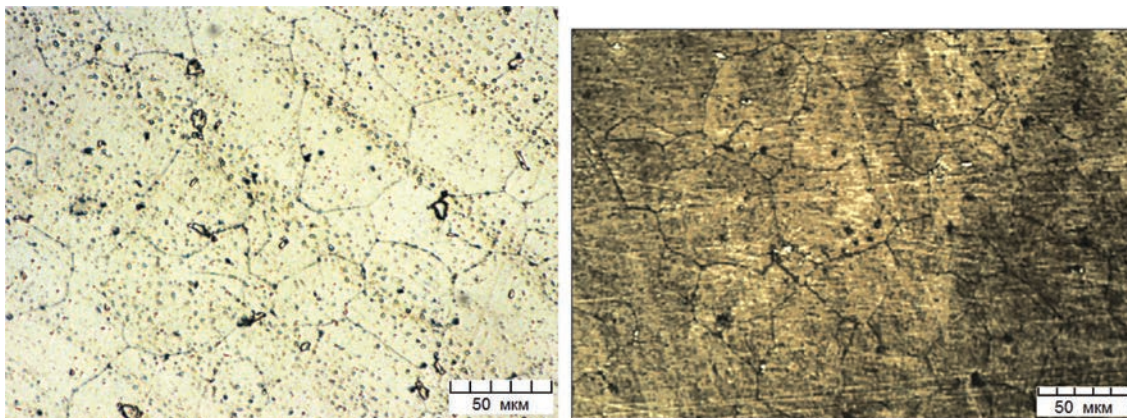


Рис. 8. Микроструктура проката стали ДИ23 после закалки от 1200 °С в масле с предварительным подстуживанием на воздухе и отпуска 675 °С. ×500

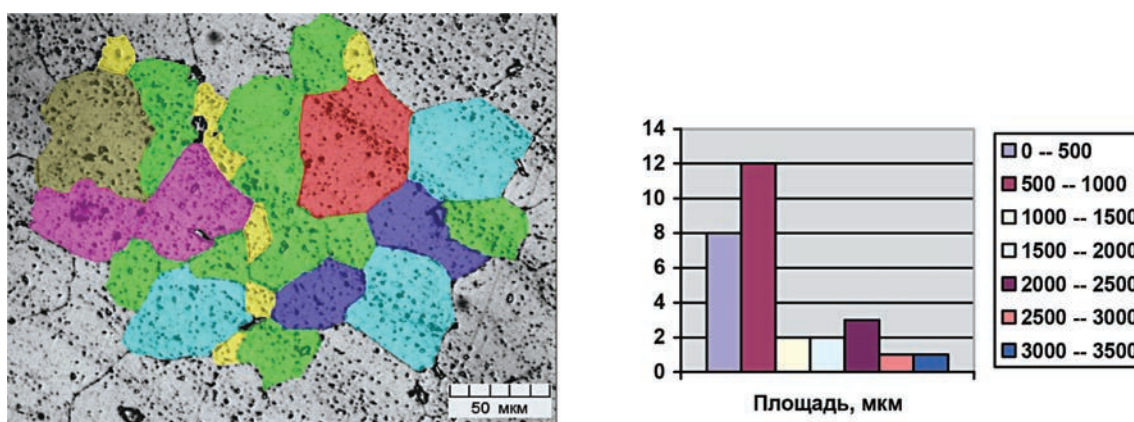


Рис. 9. Маски выделенных зерен и гистограммы их распределения согласно размерному классу по площади после закалки проката стали ДИ23 от 1200 °С, подстуживание на воздухе, затем охлаждение в масле и отпуск 675 °С

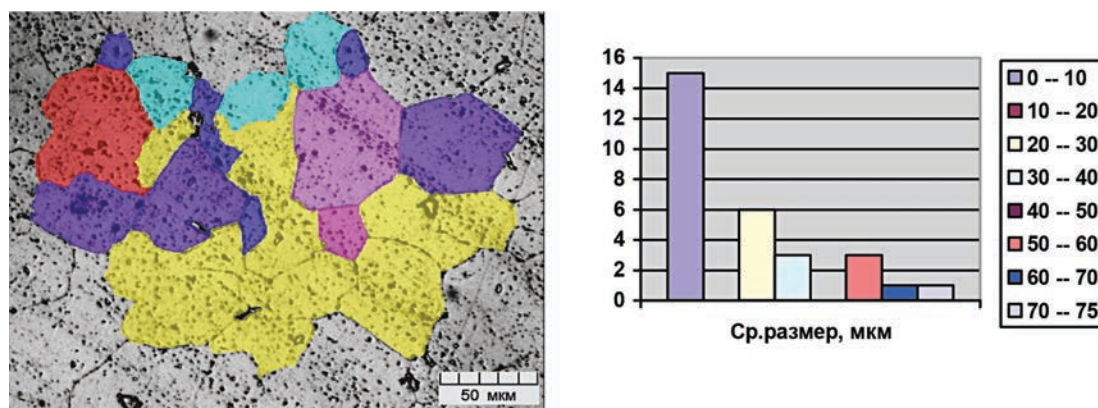


Рис. 10. Маски выделенных зерен и гистограммы их распределения согласно размерному классу по среднему размеру после закалки проката стали ДИ23 от 1200 °С, подстуживание на воздухе, затем охлаждение в масле и отпуск 675 °С

ние стали стало возможным из-за изменения процесса закалки: сразу после нагрева при 1220 °С последовало охлаждение в масле и повышение температуры отпуска до 680–690 °С. Эффект повышения стойкости пуансонов стал сразу заметен (см. таблицу, п. 6): более чем в 2 раза по сравнению с закалкой с 1200 °С и отпуском 675 °С (п. 4).

После нагрева под закалку до температуры 1220 °С, охлаждения в масле и высокого отпуска 680–690 °С (рис. 11) карбидной фазы практически столько же, сколько и в предыдущем случае (нагрев при 1200 °С). Несколько укрупнились карбиды, расположенные на стыках границ зерен. Расчет размера зерна проводили по снимкам, полученным при увеличении 500 (рис. 12). Максимальное количество зерен соответствует размеру 20–60 мкм, а по площади – от 250 до 650 мкм², т. е. по сравнению с предыдущим нагревом образцов до 1160–1200 °С зерно стало несколько крупнее. Для пуансонов, используемых для формо-

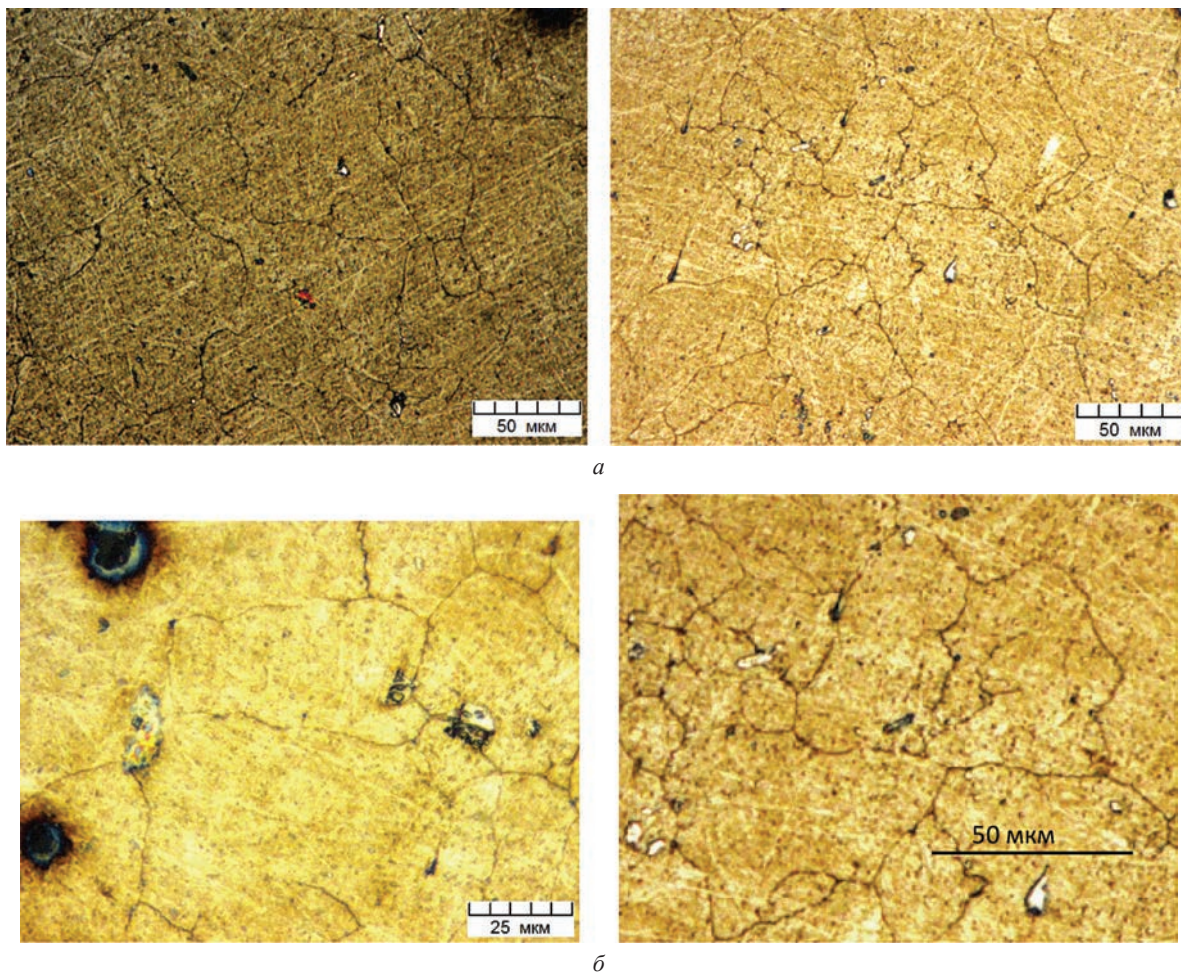


Рис. 11. Микроструктура образца проката стали ДИ23 после закалки от 1220 °С в масле и отпуска при 680–690 °С. а – $\times 500$; б – $\times 1000$

вания головки болтов диаметром 8 мм, общий эффект повышения стойкости вырос к первоначальному значению в 4 раза (см. таблицу, п. 1, 6).

Проверили также возможность нагрева при еще более высокой температуре: закалка от 1250 °С в масле с предварительным подстуживанием на воздухе 1–2 мин, отпуск 675 °С, 1,5 ч. Получили твердость проката стали ДИ23 в диапазоне 52–53 HRC. При этом стойкость инструмента составила 2–7 шт. поковок. Характер разрушения инструмента при эксплуатации изменился: он ломался у основания (рис. 13, б).

Увеличение износостойкости и теплостойкости стали с повышением температуры закалки до 1200–1220 °С связано с повышением степени легирования аустенита основными легирующими элементами при таком нагреве из-за растворения карбидов и фиксированием после охлаждения в масле более твердого и теплостойкого мартенсита закалки, отпуск которого можно проводить при температуре 670–690 °С. Структура к тому же после такого нагрева стала более однородной во всех отношениях. Также установили (рис. 14), что с повышением температуры нагрева под закалку закономерно повышаются средние величины площади и диаметра зерна проката стали 5Х3В3МФС.

Таким образом, варьируя температуру нагрева и условия охлаждения при закалке, а также температуру отпуска в широком диапазоне, удалось добиться повышения стойкости высоконагруженного инструмента за счет только оптимизации параметров технологического процесса термической обработки. Процесс испытания стойкости проводили на ОАО «Минский завод специального инструмента и технологической оснастки» для изготовления пуансонов при формовке головок болтов диаметром 8 и 10 мм соответственно с шестигранными отверстиями диаметром 6 и 8 мм.

Ожидаемого эффекта удалось достичь формированием типа структуры (рис. 6, 8, 11), когда была получена высокая износостойкость стали: сохранена нужная пластичность деформированного состояния и создана повышенная консервативность структуры к последующему нагреву при эксплуатации за счет закалки с более высоких температур в масле и отпуска при 670–690 °С.

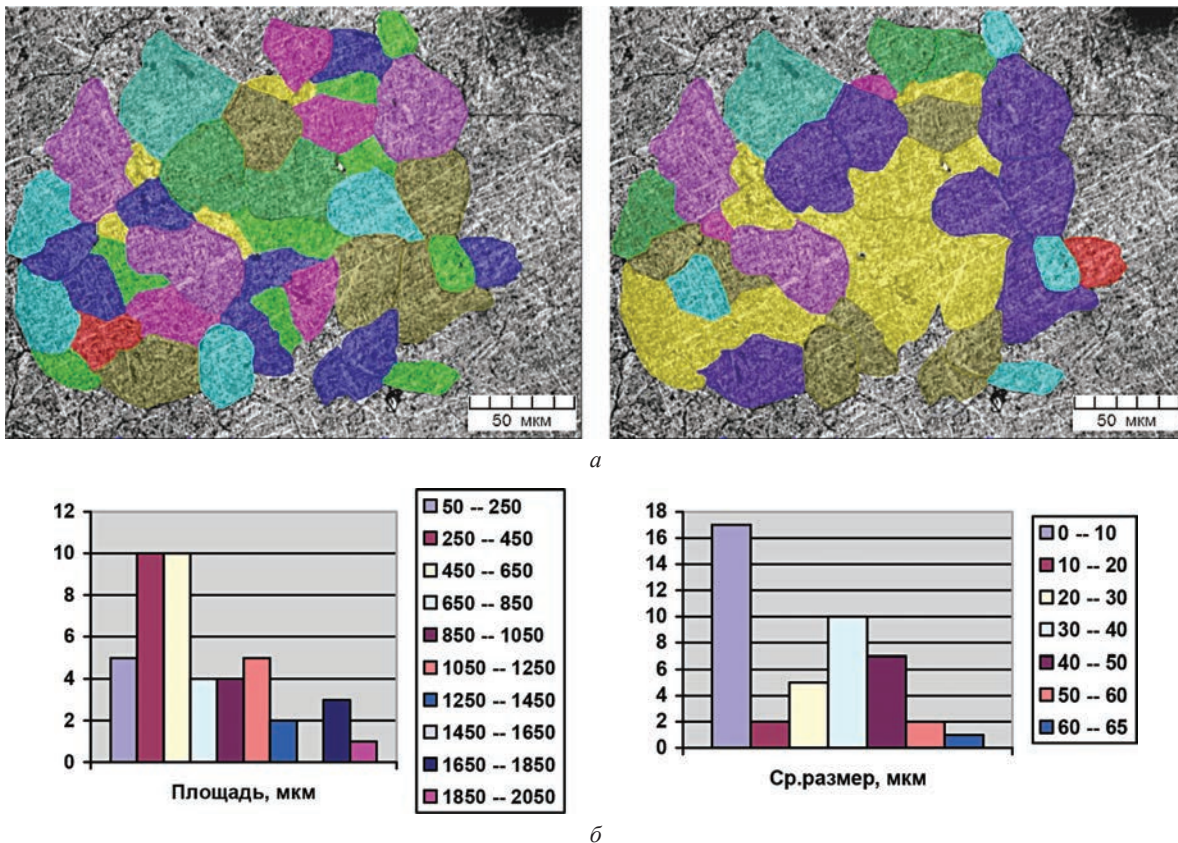


Рис. 12. Маски выделенных зерен (а) и гистограммы их распределения (б) согласно размерному классу по площади и среднему размеру после закалки образца проката стали ДИ23 от 1225°С в масле и отпуска при 680–690 °С. а – х500



Рис. 13. Пуансоны после завершения эксплуатации: выход из строя по причине отрыва шестигранника (а) или по причине «сломался у основания» (б)

В практике использования частей штампов из проката или ковальной заготовки стали ДИ23 следует принимать во внимание, что быстрый их выход из строя по причине смятия гравюры – это результат применения не оптимального режима их термической обработки (даже и при получении рекомендованной твердости). В этом случае для каждого вида инструмента следует находить вариант проведения процесса закалки, когда возможно поднятие температуры нагрева перед охлаждением в масле от 1140 до 1200 °С, подбирая необходимую выдержку по времени высокотемпературного нагрева, а затем – темпе-

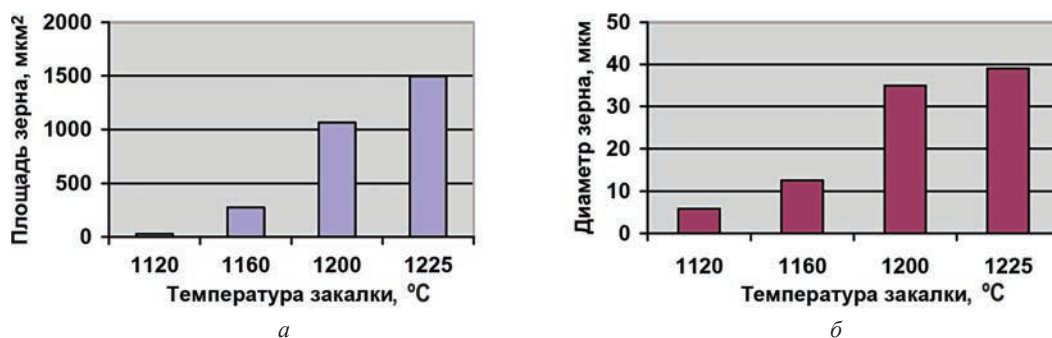


Рис. 14. Изменение средних значений площади (а) и максимального диаметра зерна проката стали 5Х3В3МФС (б) в зависимости от температуры закалки

ратуру и время отпуска. Здесь уже главным элементом технологического процесса становится соответствующая точность регистрации температуры при проведении нагрева под закалку, обеспечивающая колебания температуры в печи или ванне не более 10 °C от заданной.

Литература

1. Скрынченко Ю. М., Позняк Л. А. Работоспособность и свойства инструментальных сталей. Киев: Наукова думка, 1979. 168 с.
2. Позняк Л. А., Скрынченко Ю. М., Тишаев С. И. Штамповые стали. М.: Metallurgija, 1980. 244 с.
3. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. 4-е изд., перераб. М.: Metallurgija, 1975. 584 с.

References

1. Skrynchenko Yu. M., Poznjak L. A. *Rabotosposobnost' i svojstva instrumental'nyh stalej* [The efficiency and properties of tool steels]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1979, 168 p.
2. Poznjak L. A., Skrynchenko Yu. M., Tishaev S. I. *Shtampovye stali* [Die stamps steels]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980, 244 p.
3. Geller Yu. A. *Instrumental'nye stali* [Tool steel]. Moscow, Metallurgija Publ., 1975, 584 p.