УДК 531.7534.1.08+620.17.08

КРИОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ – ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

[1]КОКОРИН Н. А., [2]ТАРАСОВ В. В., [3]МИХАЙЛОВ Ю. О., [3]ТРИФОНОВ И. С.

[1] ООО «НПЦ «КриоТехРесурс», 426028, г. Ижевск, ул. Пойма, 3а
[2] Институт механики Уральского отделения РАН, 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
[3] Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

АННОТАЦИЯ. В статье определено влияние криогенной обработки на режущие свойства и стойкость сверл из быстрорежущей стали. Среднее значение твердости сверл после криогенного воздействия возросло на 3,7 единиц HRC. Средний разброс значений твердости инструмента после криогенной обработки снизился на 4,9 %. Получены результаты по оценке влияния криогенной обработки на повышение абразивной износостойкости быстрорежущей стали с PVD-покрытием.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: криогенная обработка, быстрорежущая сталь, PVD – покрытия, обработка в атмосфере сухого и перегретого пара, скорость резания, стойкость, продуктивность, производительность, абразивная износостойкость.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрорежущие стали получили широкое применение, благодаря способности сохранять мартенситную структуру и соответственно высокую твердость, прочность и износостойкость при повышенных температурах, возникающих в режущей кромке при резании с большой скоростью [1].

Значительно повысить ресурс, стойкость и режущие свойства инструмента из этих материалов можно за счет дополнительных операций: обработки в атмосфере сухого и перегретого пара; нанесением PVD-покрытий; криогенной обработки.

Обработка в атмосфере сухого и перегретого пара обеспечивает повышение стойкости инструмента на 50 – 75 % за счет образования окисной поверхностной пленки толщиной 2 – 5 мкм, которая защищает инструмент от коррозии, а также удерживает смазочный материал, снижает коэффициент трения и препятствует привариванию стружки к инструменту при резании. Кроме того, обработка паром устраняет недоотпуск, полученный при термообработке и снимает шлифовальные напряжения в инструменте [2].

Другим средством дополнительного повышения износостойкости режущего инструмента из быстрорежущих сталей является применение PVD-покрытий, которые обладают высокой твердостью, теплопроводностью и химической устойчивостью при низком коэффициенте трения. Стойкость инструмента с PVD-покрытием повышается в 1,5 – 2 раза [3].

Перспективной технологией упрочнения, основанной на преобразовании остаточного аустенита в мартенсит и стабилизации поверхностной твердости является криогенная обработка (КО) стали [4]. Она предусматривает охлаждение быстрорежущей стали, прошедшей закалку и многократный отпуск, до температуры жидкого азота, выдержку при этой температуре, нагрев и последующий низкий отпуск. Это приводит к повышению износостойкости инструмента в 1,2 – 2 раза за счет высокой и стабильной твердости, низкого коэффициента трения, повышения теплопроводности.

Целью данной работы является оценка влияния дополнительной КО на абразивную износостойкость термически обработанной стали Р6М5 с PVD-покрытием и на эффективность резания инструментом из этой же стали, обработанной в атмосфере сухого и перегретого пара.

КО режущего инструмента (сверла, плашки, метчики и т.п.) изменяет его физико-механические свойства (твердость, прочность, ударную вязкость, пластичность, теплопроводность, удельную объемную теплоемкость и др.), что необходимо учитывать при назначении режимов резания инструментом.

Скорость резания V_p традиционно рассчитывают по эмпирическим формулам, установленным для каждого вида обработки. В общем виде её можно представить в виде [1]:

$$V_p = V_{mб}\, k_v. \qquad (1)$$

Вычисленная с использованием табличных данных скорость резания $V_{mб}$ учитывает «стандартные условия» резания (обработка стали 45, с $\sigma_в$= 750 МПа, без корки, режущим инструментом из стали Р6М5, удовлетворяющим требованиям ГОСТа и т.д.).

Для получения значений скорости резания V_p инструментом после КО вводится поправочный коэффициент k_v, учитывающий их отличие от «стандартных» условий:

$$k_v = K_{мv}\, K_{пv}\, K_{иv}, \qquad (2)$$

где $K_{мv}$ – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала; $K_{пv}$ – коэффициент, учитывающий состояние поверхности обработки; $K_{иv}$ – коэффициент, учитывающий влияние инструментального материала.

Для определения значения $K_{иv}$ инструмента из Р6М5, после КО реализован производственный эксперимент, сущность которого заключается в определении оптимальной скорости резания при сверлении с позиции максимальной стойкости инструмента, поломки сверл не допускались. Подача инструмента механизированная – 0,14 мм/об. Обрабатывались глухие отверстия ∅ 5,7 мм, глубиной 18 мм, с обильным охлаждением 5%-ным раствором эмульсола. Обрабатываемый материал – сталь 45 (207 НВ), шероховатость поверхности – Rz40.

Для исследования использовались сверла спиральные ∅ 5,7 мм (сталь Р6М5) с цилиндрическим хвостовиком средней серии по ГОСТ 10902-77 отечественного производства, обработанные в атмосфере перегретого пара. Фиксировался химический состав быстрорежущей стали (спектральный анализ), представленный в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали контрольных сверл

Химический элемент	Проба №1	Проба №2	Среднее	Р6М5*)
C	1,06	1,26	1,16 ↑	**0,82 – 0,90**
Si	0,445	0,425	0,435	< 0,5
Mn	0,353	0,206	0,2955	0,2 – 0,5
P	0,0157	0,0055	0,0106	< 0,03
S	0,0048	0,0108	0,0078	< 0,025
Cr	3,85	3,27	3,56 ↓	3,8 – 4,4
Mo	4,33	4,10	4,215 ↓	4,8 – 5,3
Co	0,215	0,451	0,333	< 0,5
V	1,52	1,81	1,665	1,7 – 2,1
W	6,56	8,23	7,395 ↑	**5,5 – 6,5**

Примечание: *) состав по ГОСТ 19265-73.

Из данных табл. 1 видно, что реальный состав стали Р6М5 существенно отличается от стандартного по содержанию углерода, вольфрама, молибдена и хрома.

Измерялась также твердость сверл до и после КО. Измерения проводились на хвостовике в начале образования винтовой канавки. Значения твердости и ее разброса по пяти измерениям и сведены в табл. 2.

Таблица 2

Твердость сверл до и после КО

№ п/п	Твердость до КО				Твердость после КО			
	HRC_{min}	HRC_{max}	$HRC_{ср}$	R,%	HRC_{min}	HRC_{max}	$HRC_{ср}$	R,%
1	45,6	49,6	47,7	8	49,5	52,3	51,0	6
2	41,1	46,1	44,4	11	45,6	50,7	49,1	11
3	37,5	41,5	39,7	10	**38,4**	43,4	40,7	10
4	**32,4**	38,9	36,3	18	39,7	42,5	41,1	7
5	42,7	45,6	44,5	6	47,6	49,8	48,9	5
6	43,4	49,1	45,8	12	45,5	49,7	48,1	9
7	44,8	**55,7**	49,4	22	51,0	52,5	51,8	3
8	44,0	46,9	45,5	6	48,2	50,5	49,4	5
9	34,7	42,0	38,2	19	38,4	44,1	41,7	9
10	41,5	47,9	45,2	15	44,4	49,1	46,2	13
11	44,6	49,7	47,5	11	54,6	**56,1**	55,5	3
12	46,3	47,8	47,6	6	52,5	54,2	53,6	3

Среднее значение твердости после КО возросло на 4 $HRC_{ср}$ (8 HRC_{max}). КО обеспечила и снижение разброса значений твердости (R) с 12 до 7 %, что по этому информативному показателю указывает на некоторое «выравнивание» механических характеристик сверл в партии.

Криогенное упрочнение сверл проводилось в камере «ККО-0,33» с автоматизированной системой управления температурно-временными параметрами процесса. Процесс КО включал: медленное охлаждение до температуры жидкого азота, выдержку при криогенной температуре, постепенный возврат к комнатной температуре и снятие температурных напряжений. Конструкция криогенной камеры обеспечивает протекание «сухого процесса» упрочнения, т.е. исключается контакт жидкого азота с обрабатываемыми деталями и предотвращает появление микротрещин.

При проведении промышленного эксперимента фиксировалась стойкость сверл по времени. Затем на каждом уровне определялась средняя стойкость инструмента. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

Стойкость упрочненных и не упрочненных сверл при различной скорости резания

Скорость резания, м/мин	Средняя стойкость инструмента до переточки - T_i, мин		Увеличение стойкости, %
	без упрочнения	после КО	
8,95	102	125	22,5
11,27	118	138	17
22,37	175	196	12
28,64	145	166	14,5
22,37*)	21	32	52

Примечание: *) обработка без применения СОЖ.

Экспериментальные данные показали, что КО стабильно повышает стойкость инструмента от 12 до 22 %.

Характерно, что лучшие показатели стойкости достигаются при меньших скоростях резания, когда износ сверла по главным режущим кромкам превалирует над износом по поперечной кромке сверла. Износ сверл, работающих при повышенных скоростях,

напротив, развивается преимущественно по поперечной кромке инструмента и в этом случае имеет схожий характер с износом главных режущих кромок.

Дополнительно испытаны сверла с упрочнением и без него на скорости резания 22,37 м/мин без подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Результаты показали, что подача СОЖ повышает стойкость сверл без упрочнения в 8,3 раза, а криогенно обработанных – в 6 раз. Увеличение стойкости сверл, с криогенным упрочнением и без него при сверлении, без СОЖ сохраняется и составляет 52 %.

Износ сверл в условиях отсутствия подачи СОЖ на повышенных скоростях резания преимущественно по главным режущим кромкам на максимальном радиусе сверла, вплоть до посинения главной режущей кромки сверла без КО. Главная режущая кромка сверла с криогенным воздействием имеет цвета побежалости при аналогичной величине износа. Из представленной качественной оценки износа сверл, работающих в условиях без подачи СОЖ, можно предположить, что теплопроводность материала сверл с криогенным упрочнением выше, чем быстрорежущей стали без КО.

Количество обработанных отверстий сверлами с КО в среднем превышает на 48 отверстий по сравнению с количеством отверстий, обработанных сверлами без криогенного упрочнения (табл. 5).

Наибольший прирост количества отверстий наблюдается на режимах с наименьшей производительностью обработки (рис. 1).

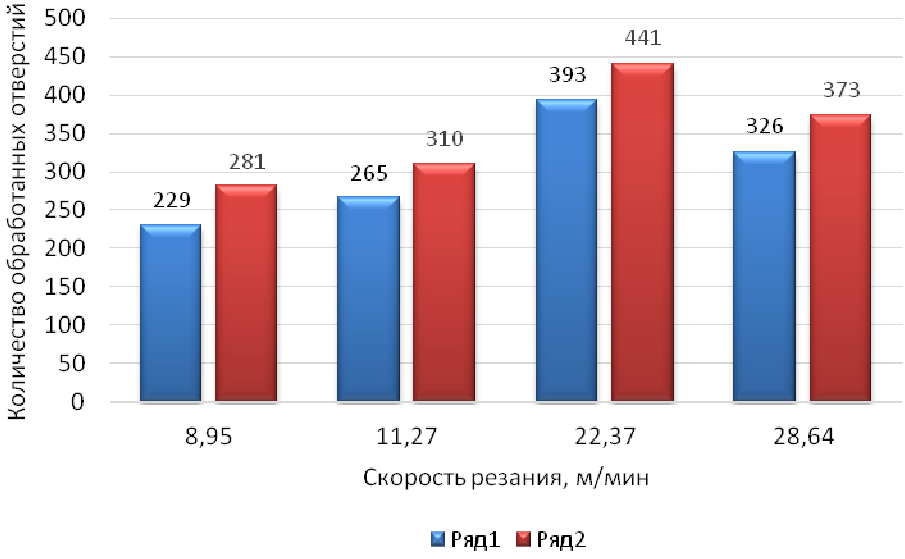

Рис. 1. Диаграмма количества обработанных отверстий быстрорежущим инструментом с криогенным упрочнением (ряд 2) и без упрочнения (ряд 1) при различных скоростях резания

Оперировать критериями стойкости инструмента и количеством обработанных отверстий инструментом до переточки не всегда удобно. При оценке повышения производительности технологической операции в качестве критерия пользуются продуктивностью обработки. Полученные экспериментальные данные по продуктивности сверления отверстий быстрорежущим инструментом при различных скоростях резания приведены в табл. 4.

В результате промышленного эксперимента проведено две серии опытов (табл. 4). Первая серия – при малых скоростях резания подтвердила наличие возрастающей ветви зависимости объема срезанного металла от скорости резания $W = f(V_p)$ (рис. 3). Вторая серия опытов подтвердила существование ниспадающей ветви зависимости скорости резания от стойкости инструмента $W = f(V_p)$.

Пересечение линий ниспадающей и возрастающей ветвей зависимости объема срезанного металла от скорости резания $W = f(V_p)$ дает оптимальное значение скорости резания по критерию максимальной производительности для инструмента с криогенным упрочнением и без него.

Таблица 4

Эффективность сверления отверстий быстрорежущим инструментом с КО-упрочнением и без упрочнения

Скорость резания, м/мин	Объем срезанного металла W, мм^3		Рост объема срезаемого металла, %
	без упрочнения	КО	
8,95	163536	200671	92
11,27	189244	221980	66
22,37	280653	314931	12
28,64	232806	266371	35

Зависимость эффективности сверления (объем металла W, удаленного в виде стружки из обработанного отверстия) быстрорежущим инструментом с криогенным упрочнением и без него от скорости резания представлена на рис. 2. Максимальная эффективность сверления неупрочненным быстрорежущим инструментом составляет $\approx 293\,333$ мм^3 при скорости резания $V_p = 19{,}75$ м/мин. Экстремальное значение эффективности применения криогенно обработанного инструмента при скорости резания $V_p = 20{,}7$ м/мин соответствует объему $\approx 315\,000$ мм^3.

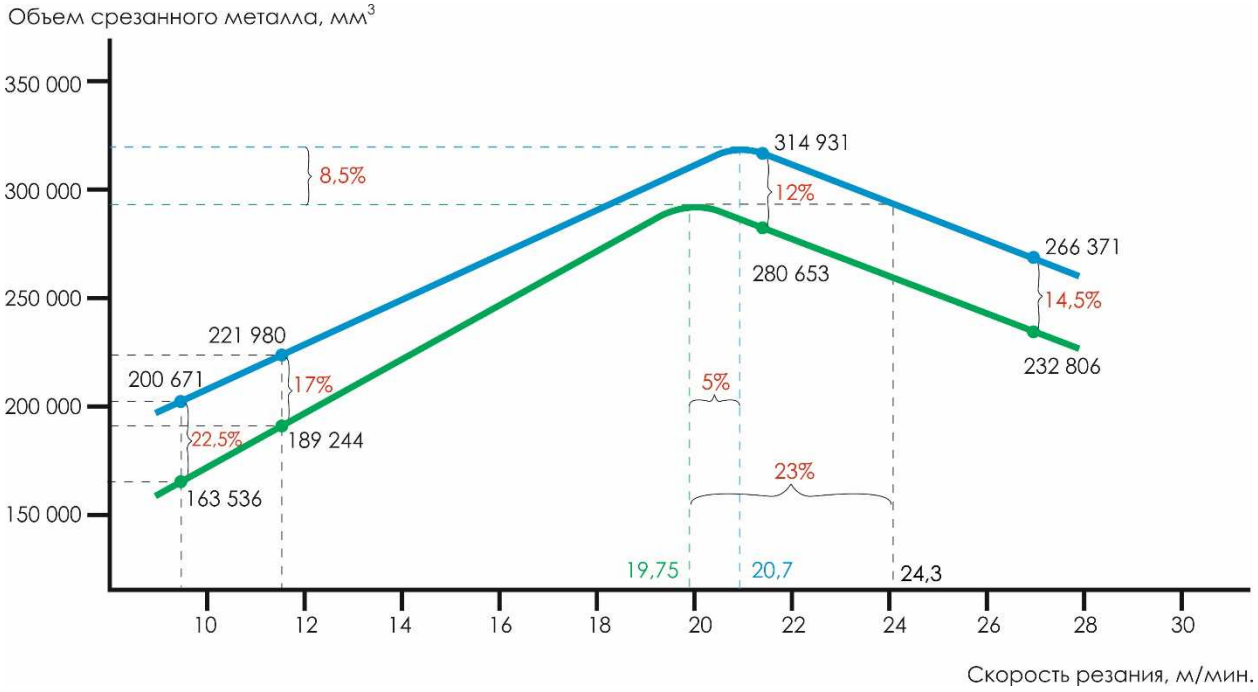

Рис. 2. Зависимость эффективности сверления быстрорежущим инструментом с КО (1) и без упрочнения (2) при различных скоростях резания

Однако максимальную эффективность (293 333 мм^3) сверления быстрорежущим инструментом без упрочнения можно обеспечить криогенно упрочненным инструментом с большей производительностью на скорости резания $V_p \approx 24{,}3$ м/мин. Тогда производительность обработки быстрорежущими сверлами с КО превысит производительность обработки сверлами без криогенной обработки на 23 %.

Определение оптимальной скорости резания при сверлении инструментом с криогенной обработкой, с учетом максимальной стойкости инструмента из быстрорежущей стали без криогенного упрочнения и эквивалентной эффективности позволяет обратиться к определению поправочных коэффициентов.

Значения поправочного коэффициента K_{uv}, учитывающего влияние инструментального материала на скорость резания в зависимости (2) [5], могут быть дополнены для быстрорежущей стали Р6М5*) с КО соответствующим значением (табл. 5).

Таблица 5

Значения коэффициента K_{uv} для различных инструментальных материалов

Обрабатываемые материалы	Инструментальный материал						
	Р6М5	Р6М5*)	ВК4	ВК6	9ХС	ХВГ	У12А
Сталь, чугун, медные и алюминиевые сплавы	1,0	1,23	2,5	2,7	0,6	0,6	0,5

*) Материал после КО

Таким образом, реализованный промышленный эксперимент позволил оптимизировать скорость резания быстрорежущим инструментом после его криогенного упрочнения.

Для изучения влияния КО на абразивную износостойкость стали Р6М5 исследуемые образцы ∅ 6 мм изнашивались по свежему следу на закрепленном абразиве по отработанной методике [6, 7].

Параметры испытаний: сила нагружения образца $N = 4$Н; скорость перемещения $F = 500$ мм/мин; путь трения L = 415 мм. Варьируемый параметр – зернистость абразива (электрокорунда) Р400 и Р240. Весовой износ определялся с точностью 0,0001 грамма на аналитических весах ВЛ-120. Результаты испытаний на абразивный износ представлены на рис. 3.

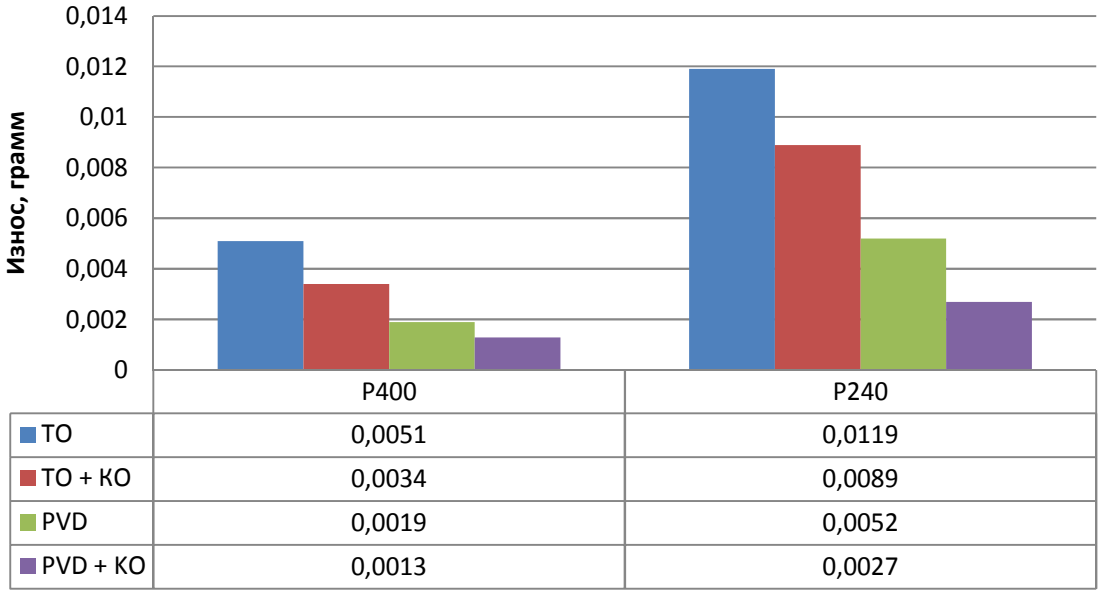

Рис. 3. Изменение износа образцов из стали Р6М5, обработанных по различным технологическим схемам

Сравнение износа образцов, обработанных по различных технологическим схемам при испытании в условиях мелкого (Р400) и более крупного (Р240) абразивного зерна, позволяет сопоставить эффективность тех или иных технологических решений (см. табл. 6).

Таблица 6

Относительная износостойкость быстрорежущей стали, обработанный по различным технологическим маршрутам

Относительная износостойкость*)	Абразивная шкурка	
	Р400 (28…40 мкм)	Р240 (50…63 мкм)
I^{KO}/I^{TO}	1,33	1,25
I^{PVD}/I^{TO}	1,63	1,56
I^{PVD}/I^{KO}	1,44	1,48
I^{PVD+KO}/I^{PVD}	1,32	1,42
I^{PVD+KO}/I^{TO}	1,75	1,77

Примечание: здесь $I^{i*)}$ – величина износа образцов, обработанных по соответствующей индексу технологии (КО – криогенная обработка; ТО – термическая обработка; PVD – технология с использованием PVD-покрытий; знак (+) означает последовательное применение соответствующих технологий).

В целом достаточно очевидно, что КО является эффективным средством повышения износостойкости закаленного инструмента из стали Р6М5, что также было подтверждено результатами эксплуатационных испытаний.

В частности, в условиях производственных испытаний по определению стойкости фрезы модульной 2510-2314 ГОСТ 16771 (материал сталь Р6М5 с PVD-покрытием) после КО установлено увеличение ресурса работы фрезы в 2 раза: фреза без криогенного упрочнения в среднем до переточки обрабатывала 8 деталей, а фреза с КО – 16 деталей.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований по оценке влияния дополнительной КО на абразивную износостойкость термически обработанной стали Р6М5 с PVD-покрытием и на эффективность резания термически обработанной стали Р6М5 дополнительно обработанной в атмосфере сухого и перегретого пара можно сделать следующие выводы:

- КО инструмента из быстрорежущей стали является эффективным способом повышения его стойкости от 12 до 22 %, эффективности с 12 до 92 % и производительности резания на 23 % по сравнению с инструментом, обработанным в атмосфере сухого и перегретого пара;
- прирост стойкости сверл с КО зафиксирован также и при их эксплуатации без подачи СОЖ на уровне 52 %;
- КО обеспечивает повышение абразивной износостойкости на 25 – 33 % в исследуемой области размера абразива (Р400 – Р240) по сравнению с термообработкой;
- абразивная износостойкость образцов с наибольшей добавленной стоимостью с PVD-покрытием и дополнительной криогенной обработкой (PVD+КО) выше на 32 – 42 % в исследуемой области размера абразива (Р400 – Р240) по сравнению с образцами с PVD-покрытием;
- в результате эксплуатационных испытаний модульных фрез из быстрорежущей стали с PVD-покрытием и дополнительной КО установлено увеличение ресурса работы инструмента в 2 раза;
- полученные оценки качественно совпадают при испытаниях для обоих вариантов использованного в исследованиях абразива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1979. 320 с.

2. Гладкова Е. Н. Теоретические основы и технология паротермического оксидирования. Саратов: СГУ, 1973. 103 с.

3. Гугля А. Г., Неклюдов И. М. Покрытия на базе нитрида хрома. Опыт создания и исследования // Успехи физики металлов. 2005. Т. 6. С. 1001-1055.

4. Кокорин Н. А., Тарасов В. В., Трифонов И. С. Криогенное упрочнение промышленных ножей из стали 9ХС для повышения их износостойкости // Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18, № 2. С. 257-264.

5. Безъязычный В. Ф., Аверьянов И. Н., Кондюков А. В. Расчет режимов резания. Учебное пособие. Рыбинск: РГАТА, 2009. 185с.

6. Тарасов В. В., Данилов И. А., Кокорин Н. А., Кондратенков М. С., Трифонов И. С. Исследование абразивной износостойкости серого чугуна с криогенным упрочнением // В сборнике «Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов». Ижевск: Изд-во ИМ УрО РАН, 2015. С. 190-198.

7. Тарасов В.В., Трифонов И.С., Пузанов Ю.В., Бажин А.Г. Способ испытания материалов на абразивное изнашивание // Патент РФ № 2601502, 2016.

CRYOGENIC IMPACT – THE FACTOR OF INCREASE OF RESOURCE HIGH SPEED STEEL TOOL

[1]Kokorin N. A., [2]Tarasov V. V., [3]Mihailov Y. O., [3]Trifonov I. S.

[1] LTD "KrioTehResurs", Izhevsk, Russia
[2] Institute of Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Izhevsk, Russia
[3] Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

SAMMARY. In article influence of cryogenic treatment on the cutting properties and durability of high-speed steel drill bits, mean hardness of drills after cryogenic impact increased by 3.7 units HRC the average hardness values of the dispersion tool after cryogenic processing decreased by 4.9 %. Results of cryogenic impact assessment processing on improving abrasive wear resistance of high speed steel with PVD-coating.

KEYWORDS: cryogenic processing, high-speed steel, PVD-cover, atmospheric processing of dry and superheated steam, cutting speed, resistance, productivity, performance, abrasive wear resistance.

REFERENCES

1. Lahtin Y. M. *Metallovedenie I termicheskaja obrabotka menallov*. 2-e izd., pererab. i dop. [Metallurgy and heat treatment of metals. 2nd ed., Revised. And additional]. Moscow: Metallurgija Publ., 1979. 320 p.

2. Gladkova E. N. *Theoreticheskie osnovi I tehnologija parotermicheskogo oxidirovanija* [Theoretical bases and technology of steam-thermal oxidation]. Saratov: SGU Publ., 1973. 103 p.

3. Googlija A. G., Neklyudov I. M. Pokritija na baze nitrida hroma. Opit sozdanija I issledovanija [Coatings based on chromium nitride. The experience of creation and research]. *Uspehi fiziki metallov*. [Advances in the physics of metals], 2005, vol. 6, pp. 1001-1055.

4. Kokorin N. A., Tarasov V. V., Trifonov I. S. Kriogennoe uprochnenie promyshlennyh nozhej iz stali 9HS dlja povyshenija ih iznosostojkosti [Increase of wear resistance of industrial steel knives 9XC cryogenic hardening]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2016, vol. 18, no. 2, pp. 257-264.

5. Bez#jazychnyj V. F., Aver'janov I. N., Kondjukov A. V. *Raschet rezhimov rezanija. Uchebnoe posobie* [Calculation of cutting modes]. Tutorial. Rybinsk: RGATA Publ., 2009. 185 p.

6. Tarasov V. V., Danilov I. A., Kokorin N. A., Kondratenkov M. S., Trifonov I. S. Issledovanie abrazivnoj iznosostojkosti serogo chuguna s kriogennym uprochneniem [Study of the abrasive wear resistance of gray cast iron with cryogenic hardening]. *V sbornike Mehanika i fiziko-himija geterogennyh sred, nanosistem i novyh materialov* [In the collection Mechanics and physicochemistry of heterogeneous media, nanosystems and new materials]. Izhevsk: IM UrO RAN Publ., 2015, pp. 190-198.

7. Tarasov V. V., Trifonov I. S., Puzanov Ju. V., Bazhin A. G. Sposob ispytanija materialov na abrazivnoe iznashivanie [Method for testing materials for abrasive wear]. *Patent RU 2601502*, 2016.

Кокорин Николай Анатольевич, кандидат технических наук, руководитель отдела научных исследований ООО «НПЦ «КриоТехРесурс», тел. 8(3412)334-455, e-mail: info@cryoteh.ru

Тарасов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ИМ УрО РАН, e-mail: tvv@udman.ru innovation@istu.ru

Михайлов Юрий Олегович, доктор технических наук, профессор, проректор ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, e-mail: innovation@istu.ru

Трифонов Игнат Сергеевич, аспирант ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, e-mail: mike_i_90@mail.com