

Оценка триботехнических характеристик стали 40X после закалки деформирующим резанием

© С.Г. Васильев¹, А.Г. Дегтярева¹, Н.Н. Зубков¹,
В.В. Попцов², В.Н. Симонов¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ООО «Секо Тулс», Москва, 123242, Россия

В статье рассмотрена возможность повышения износостойкости деталей машин методом поверхностной закалки деформирующим резанием как альтернатива существующим технологиям упрочнения. Поверхностная закалка деформирующим резанием осуществляется на стандартном металлорежущем станке при полном исключении дополнительного оборудования и отдельной операции упрочнения, является менее трудоемкой и более экономичной по сравнению с традиционными методами. Представлена разработанная оригинальная методика ускоренных сравнительных триботехнических испытаний на машине трения типа Amsler A135 для подтверждения повышения износостойкости поверхности после применения закалки деформирующим резанием. Приведены результаты исследования поверхностей образцов из стали 40X после упрочнения рассматриваемым методом, упрочнения после объемной закалки, а также без упрочнения. Измерена микротвердость и выполнен анализ микроструктуры поверхностного слоя микрошлифов из продольных срезов испытанных образцов. Исследования показали, что метод закалки деформирующим резанием позволяет создавать упрочненный поверхностный слой повышенной твердости с особой макрогеометрией, более износостойкий по сравнению с полученным после объемной закалки.

Ключевые слова: деформирующее резание, поверхностное упрочнение, твердость, износостойкость, термическая обработка, закалка, триботехнические испытания

Введение. Для широкой номенклатуры деталей машин, работающих в условиях интенсивного изнашивания, проблема повышения износостойкости может быть решена использованием технологий поверхностного упрочнения.

Среди известных технологий поверхностного упрочнения стальных деталей трения традиционными являются закалка токами высокой частоты, химико-термическая обработка, поверхностное пластическое деформирование. В последнее время большое внимание уделяется методам обработки концентрированными потоками энергии, поскольку при высокоскоростных температурных и силовых воздействиях формируются особые структуры с повышенными эксплуатационными характеристиками [1]. Критерием выбора рациональной технологии поверхностного упрочнения является компромисс между обеспечением высоких эксплуатационных свойств и стоимостью реализации технологии.

Технология деформирующего резания (ДР), самостоятельно или в комбинации с другими технологическими процессами, входит в группу методов повышения износостойкости пар трения деталей машин [2], к которым относится и метод закалки поверхностного слоя детали деформирующим резанием [3, 4].

Несомненно, испытания в производственных условиях с последующим технико-экономическим обоснованием являются главным критерием рациональности использования предлагаемой технологии упрочнения деталей в промышленности. Но такой подход требует проверки множества вариантов, трудозатратен и экономически нецелесообразен. До проведения производственных испытаний допускаются сравнительная оценка поверхностного упрочнения методами ускоренных лабораторных испытаний и отсева неприемлемых вариантов. Такие лабораторные испытания в отличие от испытаний в реальных условиях работы изделия не требуют больших временных затрат, позволяют варьировать условия трения, выделять основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики, и используются в научно-производственной практике [5]. Лабораторные триботехнические испытания проводятся на машинах трения, что позволяет контролировать в процессе эксперимента такие параметры, как момент трения, температура в зоне контакта трущихся тел, линейный износ образцов.

В настоящей работе лабораторные испытания на машине трения проводились с целью сравнения триботехнических характеристик поверхностных структур, закаленных методом ДР и по стандартной технологии объемной закалки.

Методика испытаний на износостойкость. В качестве станда для триботехнических испытаний использована модернизированная машина трения Amsler A135 (рис. 1), оснащенная электронными компонентами для управления режимами работы, автоматизированного съема и обработки данных на ЭВМ [6].

С помощью преобразователя частоты I векторного типа модели ПЧВ 101-K75-B программно производилось управление частотой вращения вала электродвигателя II , а следовательно, устанавливалась необходимая скорость относительного проскальзывания контртела 6 и образца 7 и регулировалась продолжительность циклов испытаний. Линейный износ измерялся индикатором часового типа 1 МИГ-0 ГОСТ 9696–82 8 , установленного на двухкоординатный столик. С помощью столика производилось осевое перемещение индикатора для проведения измерений в разных точках образца и отвод (подвод) между отдельными циклами.

Момент трения измерялся посредством снятия показаний с потенциометра 3 , отслеживающего угловое положение маятника 2 ,

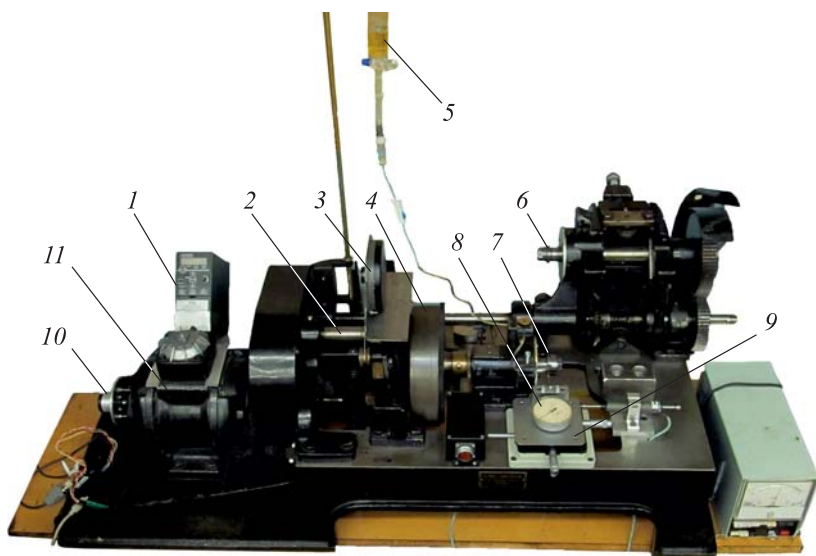


Рис. 1. Модернизированная машина трения Amsler A135:

1 — преобразователь частоты; 2 — маятник; 3 — потенциометр; 4 — зубчатое колесо; 5 — система подвода смазки в зону трения; 6 — контртело; 7 — образец; 8 — индикатор; 9 — двухкоординатный микрометрический столик; 10 — энкодер; 11 — вал электродвигателя

пропорциональное измеряемому моменту. Показания с потенциометра обрабатывались с помощью электронного устройства Masterkit MP730 (вольтметр + АЦП), подключаемого по интерфейсу USB 1.0/2.0 к ЭВМ, и выводились в режиме реального времени на дисплей. Данные также записывались в файл с назначенной частотой дискретизации 500 Гц.

С помощью энкодера 10 контролировалась частота вращения вала электродвигателя, показания с устройства обрабатывались USB-частотомером MasterKit MP732, выводились на дисплей и записывались в отдельный файл.

Тарировка показаний потенциометра 3 производилась путем подвешивания грузов известной массы к зубчатому колесу 4.

При разработке методики испытаний руководствовались рекомендациями, которые приведены в [7, 8].

Для проведения сравнительных испытаний образцов была использована схема трения диск — диск (рис. 2), реализующая сосредоточенный герцевский контакт. Главные достоинства этой схемы заключаются в следующем:

- 1) простота изготовления образца и контртела (по сравнению со схемой колодка — диск);
- 2) сокращение длительности приработки и продолжительности испытаний в целом (по сравнению со схемой колодка — диск);

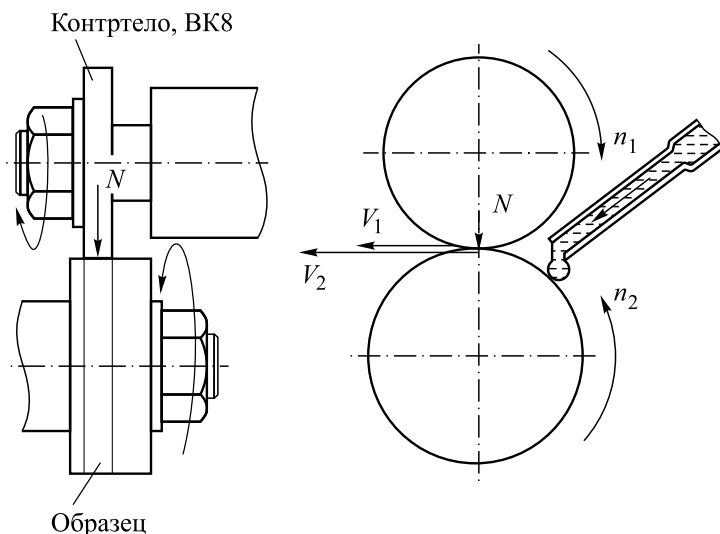


Рис. 2. Принципиальная схема испытаний:

N — сила нагружения; V_1 , V_2 — линейная скорость вращения точек на дорожке трения соответственно контртела и образца; n_1 , n_2 — частота вращения соответственно контртела и образца

3) обеспечение минимального коэффициента взаимного перекрытия, исключение влияния фрикционного разогрева в процессе испытаний;

4) создание наилучших условий для образования граничной смазки при высоких значениях контактного давления.

Геометрические параметры образца и контртела представлены на рис. 3. Материал образцов — сталь 40Х. Ширина образца увеличена для того, чтобы получить возможность проведения повторных испытаний на неизношенной части при его развороте.

В качестве контртела использовалось кольцо из твердого сплава ВК8 ГОСТ 3882–94 (87,5 HRA). Твердость и износостойкость выбранного материала существенно превышают соответствующие параметры упрочненного материала испытуемых образцов, что позволяет использовать индентор многократно.

В ходе экспериментов в зону трения капельно подавалась смазка, в качестве которой использовалось индустриальное масло И20А ГОСТ 20799–88, расход масла регулировался и составлял 4–6 капель в минуту.

Сила нагружения от массы подвижной скобы машины трения составляла $N = 185$ Н. Дополнительное нагружение не осуществлялось.

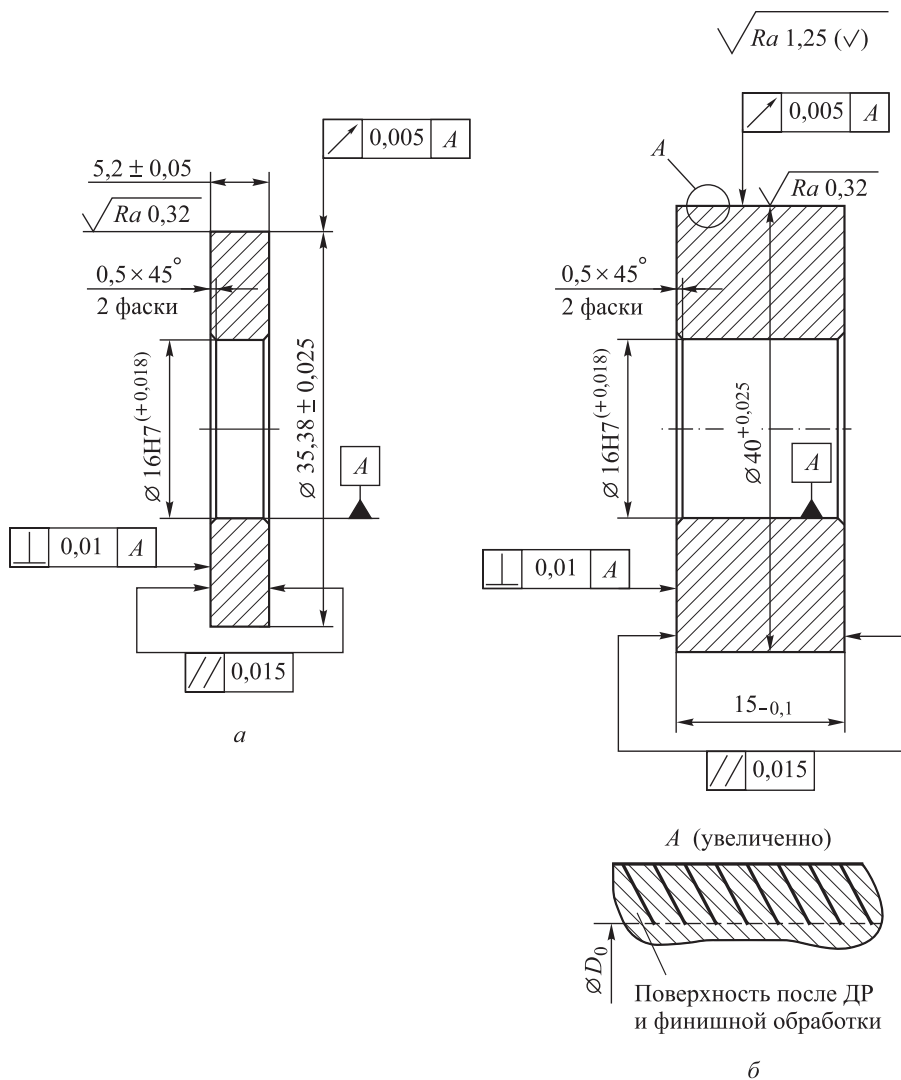


Рис. 3. Контртело и образец

Максимальное давление в контакте образец — контртело рассчитывали по формуле [9]

$$p = \sqrt{\frac{N(R_1 + R_2)}{l\pi R_1 R_2 \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}} = 445,2 \text{ МПа},$$

где $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $E_2 = 5,32 \cdot 10^5$ МПа — модули упругости образцов (сталь 40X) и контртела (сплав ВК8) соответственно; $\mu_1 = 0,3$, $\mu_2 = 0,28$ — коэффициенты Пуассона для образца и контртела;

$l = 5,2$ мм — ширина контртела; $R_1 = 20$ мм, $R_2 = 17,69$ мм — радиусы образца и контртела.

Полуширина площадки контакта [9]

$$b = \sqrt{\frac{4p(R_1 + R_2) \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}}{l\pi R_1 R_2}} = 0,051 \text{ мм.}$$

Номинальная площадь контакта $S_{\text{ном}} = 2bl = 0,53 \text{ мм}^2$.

Скорость проскальзывания вычисляли по формуле

$$V_{\text{ск}} = V_1 - V_2 = \frac{\pi D_{\text{ном}} n_2}{60000} - \frac{\pi D_{\text{к}} n_1}{60000} = 0,08 \text{ м/с,}$$

где $D_{\text{ном}} = 40$ мм — номинальный диаметр образца; $n_2 = 193$ об/мин — частота вращения образца; $D_{\text{к}} = 35,38$ мм — диаметр контртела; $n_1 = 174$ об/мин — частота вращения контртела.

Критерии окончания приработки выбирались согласно рекомендациям ГОСТ 30858–2003 и заключались в получении равномерной по ширине дорожки износа на поверхности образца и стабилизации момента трения с отклонением не более 5 %.

В процессе триботехнических испытаний измерялись следующие параметры:

падение напряжения на переменном резисторе $U_{\text{с}}$, В, характеризующее момент трения $M_{\text{тр}}$, Н · м;

линейный износ образца $h_{\text{ср}}$, мкм; на неподвижном образце без его снятия с машины трения после каждого цикла линейный износ измеряли в одних и тех же сечениях по четырем осевым линиям через 90° по длине окружности образца, результаты усредняли;

частота вращения вала электродвигателя $n_{\text{д}}$, об/мин, (показания снимали с энкодера, установленного на вал электродвигателя); частоты вращения валов образца и контртела устанавливались через передаточные отношения и контролировались цифровым фототахометром модели DT-2234C⁺.

Температуру в зоне контакта образец — контртело в процессе эксперимента не измеряли, ее приближенное значение контролировалось инфракрасным термометром модели DHS235XEL и в ходе испытаний не превышало 34°C .

Последовательность проведения испытаний:

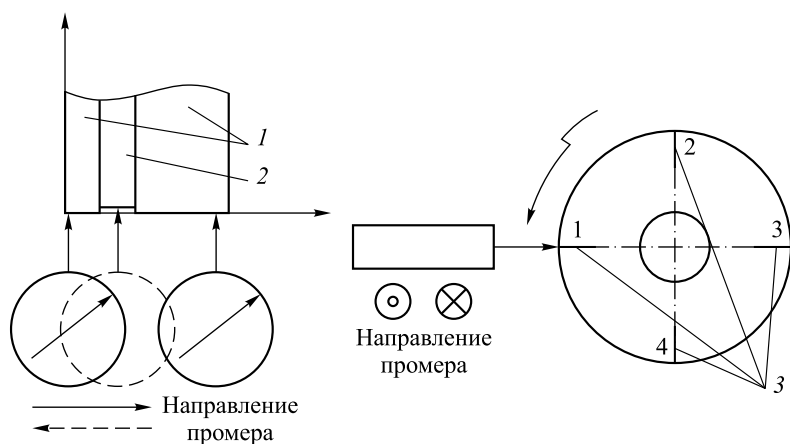
1) этап приработки: первоначальный цикл истирания образца в течение 30 мин с последующей остановкой, если критерии окончания

приработки не выполнены — проведение дополнительных циклов истирания по 15 мин с промежуточным контролем выполнения критериев;

2) после окончания приработки — измерение линейного износа по четырем сечениям, усреднение показаний;

3) этап установившегося износа: шесть циклов истирания по 60 мин; по окончании каждого цикла — остановка, измерение линейного износа по четырем сечениям, усреднение показаний.

Линейный износ дорожки трения измеряли по разности показаний индикатора относительно неизношенной шлифованной поверхности образца. Схема измерений показана на рис. 4: дорожку трения промеряли по шести точкам, на неизношенных шлифованных шейках измеряли по пять точек. Осевые координаты измеряемых точек брали неизменными от сечения к сечению и от цикла истирания к циклу. Обработку данных проводили в среде Microsoft Excel 2007. Для измерений, соответствующих шлифованным шейкам и дорожке трения, строились линии тренда, расстояние между линиями после каждого цикла являлось искомым значением линейного износа (рис. 5).

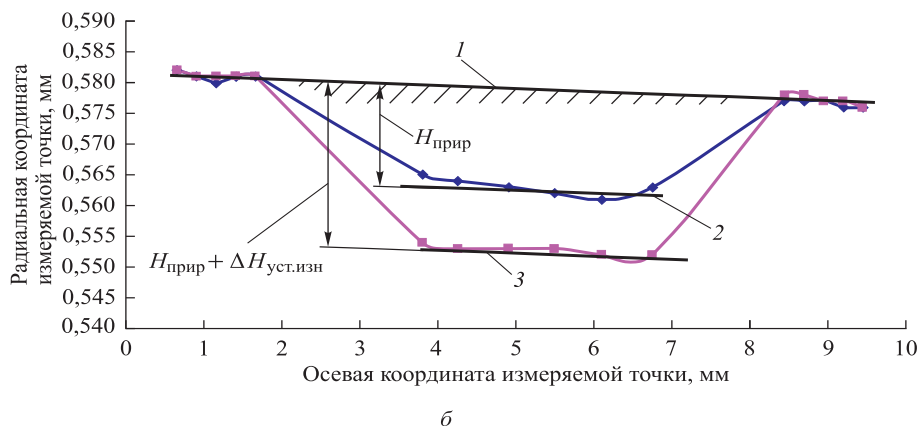


СИ: индикатор 1 МИГ-0 ГОСТ 9696–82

Тип	Класс точности	Наибольшая разность погрешностей		Размах показаний при 10 измерениях
		на шкале 200 делений	на всей шкале	
МИГ-1	0	1,5	2,0	0,5

Рис. 4. Схема измерения линейного износа:

1 — шлифованные шейки; 2 — дорожка трения; 3 — сечения промеров (1–4)



б

Рис. 5. Результаты обработки полученных данных при измерении линейного износа:

1 — измерительная база (шлифованные шейки); 2 — положение дорожки трения после приработки; 3 — положение дорожки трения после приработки и 1 ч установившегося износа; —■— сечение 1 после приработки; —◆— сечение 1 после приработки и 1 ч износа; $H_{\text{прир}}$ — линейный износ, достигнутый на образце в процессе приработки; $H_{\text{уст.изн}}$ — прирост линейного износа через установленные промежутки времени

Описание образцов для испытаний. В ходе триботехнических испытаний оценивали износостойкость образцов из стали 40Х ГОСТ 4543–71 (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика образцов для триботехнических испытаний

Обозначение образца	Вид упрочнения	Параметры упрочнения
1	Нормализация	Без упрочнения
2	Закалка в масло + низкий отпуск	Объемная закалка ($T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) в масло, низкий отпуск ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), выдержка 45 мин
3	Закалка в воду + низкий отпуск	Объемная закалка ($T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) в воду, низкий отпуск ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), выдержка 45 мин
ДР № 3	ДР	Закалка ДР без дополнительного отпуска, режим резания: $V = 3,5\text{ м/с}$; $S_0 = 0,1\text{ мм/об}$; $t = 1,0\text{ мм}$
ДР № 4	ДР + низкий отпуск	Закалка ДР, отпуск ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 45 мин), режим резания: $V = 3,5\text{ м/с}$; $S_0 = 0,1\text{ мм/об}$; $t = 1,0\text{ мм}$

Окончательная размерная обработка всех образцов производилась на операции круглого шлифования до достижения шероховатости поверхности не более $Ra\ 0,32$. Образцы после ДР предварительно обтачивались резцом из кубического нитрида бора BN на щадящих режимах для удаления основного объема припуска, предусмотренного на окончательную обработку, с учетом глубины дефектного слоя и высоты треугольных заострений на наружной части оребренной структуры.

Результаты триботехнических испытаний. Приработка образцов после ДР была более продолжительной при меньшей интенсивности изнашивания:

$H_{\text{прир.ДР № 3}} = 0,015$ мм (время приработки 120 мин);

$P_{\text{прир.ДР № 4}} = 0,014$ мм (время приработки 120 мин);

$H_{\text{прир.зак.-вода}} = 0,017$ мм (время приработки 105 мин);

$P_{\text{прир.зак.-масло}} = 0,09$ мм (время приработки 45 мин).

Результаты измерения суммарного линейного износа образцов после каждого цикла при установившемся режиме истирания представлены на рис. 6. Для наглядности разницы между упрочненными образцами кривая износа нормализованного образца не показана (за 6 ч истирания при установившемся режиме суммарный износ нормализованного образца составил $H_c = 0,145$ мм). Сравнительные данные об интенсивности изнашивания представлены на рис. 7 (интенсивность изнашивания нормализованного образца составила $I_c = 2,06 \cdot 10^{-5}$).

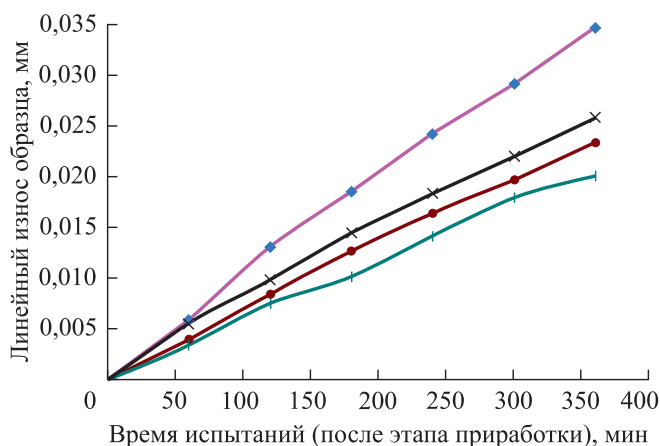


Рис. 6. Сравнительные данные о линейном износе испытываемых образцов:

♦ — закалка в масло + низкий отпуск; × — закалка в воду + низкий отпуск; ● — ДР № 3; + — ДР № 4 (ДР + низкий отпуск)

Интенсивность изнашивания незакаленного (нормализованного образца № 1) более чем в 7 раз выше соответствующего значения лучшего образца после ДР и низкого отпуска (ДР № 4). Данные об износе в период приработки, суммарном износе в процессе длительного истирания и интенсивности изнашивания свидетельствуют о том, что поверхности, упрочненные методом ДР, являются более износостойкими (на 9...41 %) по сравнению с образцами после объемной закалки. Низкий

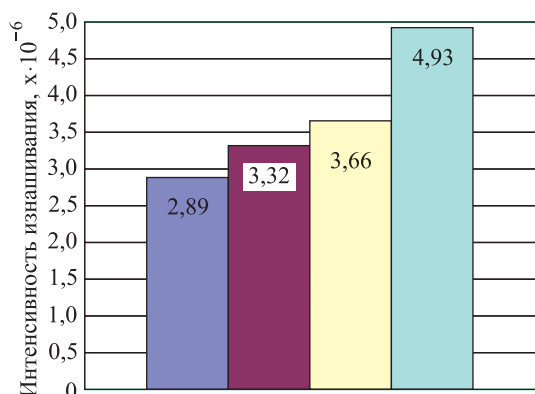


Рис. 7. Сравнительные данные об интенсивности изнашивания испытуемых образцов:
 ■ — ДР № 4 (ДР + низкий отпуск); ■ — ДР № 3;
 ■ — закалка в воду + низкий отпуск; ■ — закалка в масло + низкий отпуск

отпуск образца после закалки ДР снижает интенсивность изнашивания на 13 %, однако может быть исключен для повышения технологичности операции упрочнения и устранения необходимости использования энергоемкого термического оборудования.

Сравнительные данные о коэффициенте трения (рис. 8) показывают, что упрочненные ДР образцы имеют пониженный на 6...16 % коэффициент трения по сравнению с образцами после объемной закалки.

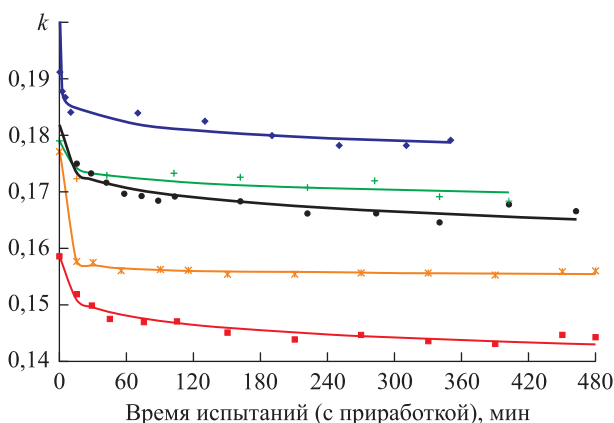


Рис. 8. Сравнительные данные о значении коэффициента трения:
 — нормализация; — закалка в воду + низкий отпуск;
 — закалка в масло + низкий отпуск; — ДР № 3;
 — ДР № 4 (ДР + низкий отпуск)

Металлография и измерение микротвердости образцов. После проведения триботехнических испытаний были выполнены металлографические исследования испытанных образцов и измерена их поверхностная твердость. Шлифы изготавливали на продольных срезах образцов, содержащих дорожку трения. Срезы выполняли вырезкой проволокой на электроэрозионном станке. Микрошлифы изготавливали на оборудовании STRUERS CitoPress-10/-20 (горячая запрессовка) и STUERS LaboPol-35 (окончательное шлифование и полирование). Травление проводили 4%-ным раствором азотной кислотой HNO_3 в спирте. Микроструктуру исследовали на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 при увеличении до 1000 крат. На рис. 9 представлены общие виды дорожек трения. Наблюдается существенное различие в глубине дорожки трения закаленных образцов и незакаленного (нормализованного) образца.

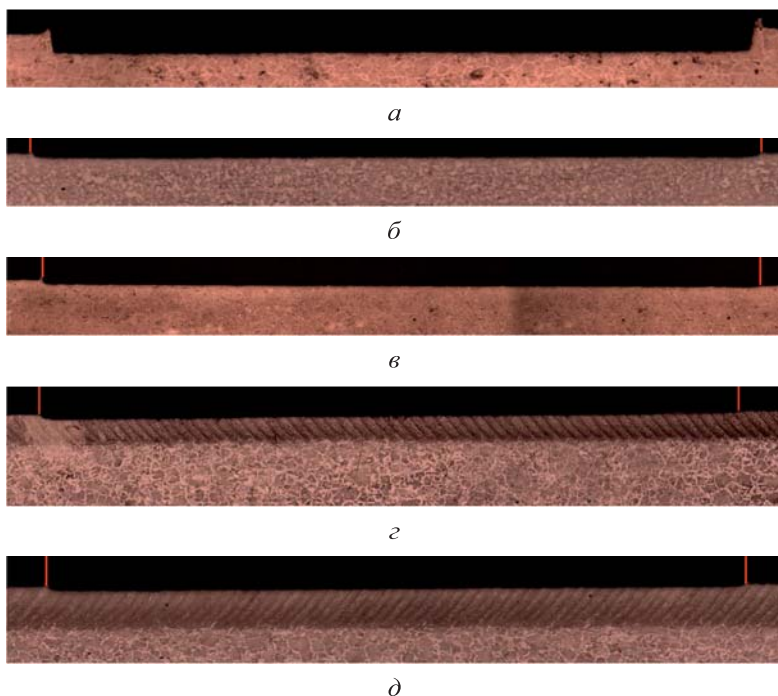
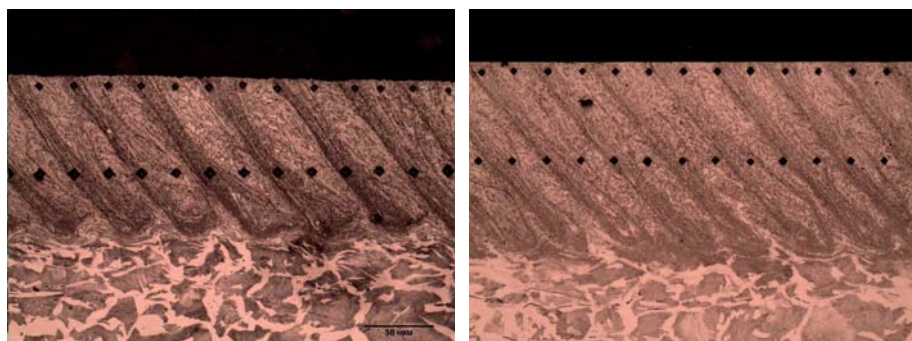


Рис. 9. Микрофотографии дорожек трения образцов $\times 25$:

а — нормализованный образец; *б* — образец с закалкой в масло и низким отпускком; *в* — с закалкой в воду и низким отпускком; *г* — с закалкой ДР без отпуска; *д* — с закалкой ДР и низким отпускком

Микротвердость измеряли методом Виккерса с нагрузкой 50 г на микротвердометре DuroScan. По линии производилась серия отпечатков с шагом, равным 0,05 мм, непосредственно под дорожкой трения и на расстоянии 0,2 мм от изношенной поверхности (рис. 10). Результаты измерений для каждого образца усредняли. Также определяли микротвердость неизношенного участка вне дорожки трения (табл. 2).



a

б

Рис. 10. Структура упрочненного слоя образцов, закаленных ДР:
a — без отпуска (образец ДР № 3); *б* — с низким отпуском (образец ДР № 4)

Таблица 2

Микротвердость поверхностного слоя образцов

Обозначение образца	Микротвердость $HV_{0,05}$	
	Под дорожкой трения	Неизношенный участок
1	290	250
2	510	420
3	710	650
ДР № 3	560	560
ДР № 4	560	480

Согласно данным табл. 2, непосредственной корреляции между значениями твердости образца и его интенсивностью изнашивания не наблюдается. Менее твердые образцы после закалки ДР показали меньшую интенсивность изнашивания по сравнению с более твердым образцом после объемной закалки с охлаждением в воде и низким отпуском.

Наличие несплошностей материала в виде границ между ребрами при обработке ДР, особая макрогеометрия поверхности могут оказать неоднозначное влияние как на механизмы износа упрочненных структур, так и на значение коэффициента трения.

С одной стороны, наличие микрозазоров и несплошностей в материале между ребрами позволяет удерживать смазку, снижая коэффициент трения, с другой — несплошности могут способствовать микровыкрашиванию ребер и ухудшать износостойкость поверхности в целом.

Метод ДР позволяет формировать на поверхности детали единое спиральное ребро, между витками которого практически нет зазоров.

Такая особая макрогеометрия поверхности может способствовать повышению задиры- и износостойкости, поскольку спиральное ребро, подобно шнеку, разрушает места микросхватываний в паре трения.

Данные табл. 2 также показывают, что непосредственно под дорожкой трения наблюдается повышение твердости у всех образцов (за исключением образца ДР № 3). Увеличение твердости поверхностных слоев можно объяснить дополнительным деформационным упрочнением под действием высоких контактных нагрузок от твердосплавного контртела.

Закключение. Ускоренные триботехнические испытания образцов показали перспективность метода поверхностной закалки ДР для повышения износостойкости деталей машин, в частности деталей узлов трения скольжения.

Применение метода закалки ДР может иметь экономические преимущества, поскольку повышается производительность операции закалки, устраняются транспортные операции при проведении термической обработки, снижается энергоемкость закалки, отпадает необходимость в специализированном термическом оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. *Технология упрочнения машиностроительных материалов*. Киев, Профессионал, 2006, 352 с.
- [2] Зубков Н.Н., Васильев С.Г. Повышение износостойкости деталей пар трения на основе метода деформирующего резания. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2013, № 8, с. 3–9.
- [3] Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В. *Способ поверхностного закалочного упрочнения режуще-деформирующим инструментом*. Пат. № 2556897, Российская Федерация, 2015, бюл. № 20, 12 с.
- [4] Васильев С.Г., Попцов В.В. Повышение твердости поверхности детали термическим воздействием с использованием деформирующего резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 12, с. 37–43.
- [5] Прудников М.И. Метод триботехнических испытаний цилиндрических поверхностей трения. *Вестник Брянского государственного технического университета*, 2008, № 2, с. 48–56.
- [6] Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Попцов В.В., Шуляк Я.И. Модернизация машины трения типа Amsler. *Смазка и трение в машинах и механизмах*, 2014, № 9, с. 33–37.
- [7] Елманов И.М., Даровской Г.В. Совершенствование методики определения коэффициента трения на машинах трения типа «Амслер». *Физика, химия и механика трибосистем*, 2009, № 8, с. 57–68.
- [8] Древаль А.Е., Васильев С.Г., Виноградов Д.В., Мальков О.В. Контрольно-измерительный диагностический стенд для экспериментальных исследований в технологии механической обработки. *Наука и образование*, 2014, № 12. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/749286.html> (дата обращения 12.12.2014).
- [9] Кац А.М. *Теория упругости*. 2-е изд, Санкт-Петербург, Лань, 2002, 208 с.

Статья поступила в редакцию 10.07.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Васильев С.Г., Дегтярева А.Г., Зубков Н.Н., Попцов В.В., Симонов В.Н. Оценка триботехнических характеристик стали 40Х после закалки деформирующим резанием. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 11.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-11-1698>

Васильев Сергей Геннадиевич — канд. техн. наук, доцент кафедры МГТУ им. Н.Э. Баумана «Инструментальная техника и технологии». Область научных интересов — повышение износостойкости деталей трения, режущий инструмент, деформирующее резание. e-mail: sergv@bmstu.ru

Дегтярева Алла Григорьевна — ассистент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — структура и свойства материалов после высокоскоростной термической обработки. e-mail: dega_70@mail.ru

Зубков Николай Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — деформирующее резание, технология машиностроения, обработка резанием, режущий инструмент. e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

Попцов Виктор Викторович — инженер по проектам ООО «Секо Тулс». Область научных интересов — машиностроение, технологические процессы обработки. e-mail: viktor.poptsov@secotools.com

Симонов Виктор Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — физическая химия материалов и технологических процессов. e-mail: simonov_vn@mail.ru

Evaluation of the tribological characteristics of steel 40X after deformational cutting hardening

© S.G. Vasilev¹, A.G. Degtyareva¹, N.N. Zoubkov¹,
V.V. Poptsov², V.N. Simonov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²SecoTools, Moscow, 123242, Russia

The article considers a possibility of increasing wear resistance of machine parts by means of deformational cutting surface hardening as an alternative to the existing hardening technologies. Surface hardening by deformational cutting is carried out using solely standard metal cutting machines excluding additional equipment and separate hardening operation. The technology is less labour-intensive and more economical than traditional ones. The article describes an original technique for accelerated comparative tribological tests on the friction machine AmslerA135 to confirm the improved surface wear resistance after application of deformational cutting hardening. This study shows the results of research aimed to compare the surfaces of steel 40X samples after deformational cutting hardening, bulk hardening and without hardening as well. The article reports on the measured microhardness and gives an analysis of the microstructure of micro-sections surface layer of tested samples longitudinal sections. The findings of this investigation demonstrate that the deformational cutting hardening allows to create a hardened surface layer of high hardness with a special macro-geometry, which is more labour-intensive in comparison with those obtained after bulk hardening.

Keywords: deformational cutting, surface hardening, hardness, wear resistance, heat treatment, hardening, tribological tests

REFERENCES

- [1] Evdokimov V.D., Klimenko L.P., Evdokimova A.N. *Tekhnologiya uprochneniya mashinostroitelnykh materialov* [The technology of hardening of engineering materials]. Kiev, Professional Publ., 2006, 352 p.
- [2] Zoubkov N.N., Vasilev S.G. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya — Hardening Technologies and Coatings*, 2013, no. 8, pp. 3–9.
- [3] Zoubkov N.N., Vasilev S.G., Poptsov V.V. *Sposob poverkhnostnogo zakalochno go uprochneniya rezhushche-deformiruyushchim instrumentom* [The method of surface hardening of the cutting-deforming tool]. Patent RF, no. 2556897, 2015, bul. no. 20, 12 p.
- [4] Vasilev S.G., Poptsov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2011, no. 12, pp. 37–43.
- [5] Prudnikov M.I. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2008, no. 2, pp. 48–56.
- [6] Zoubkov N.N., Vasilev S.G., Poptsov V.V., Shulyak Ya.I. *Smazka i trenie v mashinakh i mekhanizmax — Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2014, no. 9, pp. 33–37.
- [7] Elmanov I.M., Darovskoy G.V. *Fizika, khimiya i mekhanika tribosistem — Physics, Chemistry and Mechanics of Tribosystems*, 2009, no. 8, pp. 57–68.

- [8] Dreval A.E., Vasilev S.G., Vinogradov D.V., Malkov O.V. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2014, no. 12. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/749286.html> (accessed December 12, 2014).
- [9] Kats A.M. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. 2nd ed. St. Petersburg, Lan Publ., 2002, 208 p.

Vasilev S.G., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Tool Engineering and Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include improvement of wear resistance of friction parts, cutting tools, deformational cutting. e-mail: sergv@bmstu.ru

Degtyareva A.G., Assistant Lecturer, Materials Science and Engineering Department, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include structure and characteristics of materials after high-speed heat treatment. e-mail: dega_70@mail.ru

Zoubkov N.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Tool Engineering and Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include deformational cutting, mechanical engineering technology, machine cutting, cutting tools. e-mail: zoubkovn@bmstu.ru

Poptsov V.V., Project Engineer in SecoTools. Research interests include mechanical engineering, technological machining processes. e-mail: viktor.poptsov@secotools.com

Simonov V.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Materials Science and Engineering Department, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include physical chemistry of materials and technological processes. e-mail: simonov_vn@mail.ru