

УДК 6 20.178.16

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И РЕЛЬЕФ
ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ,
НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ**

Яковлева С.П., Махарова С.Н., Винокуров Г.Г., Мордовской П.Г., Стручков Н.Ф.

*ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского
отделения Российской академии наук», Якутск, e-mail: mordov@yandex.ru*

Исследована износостойкость стали 09Г2С после объемного наноструктурирования с применением мегапластической деформации методом равноканального углового прессования (РКУП) при 20°С и последующего низкотемпературного отжига при 350 и 450°С. Показано, что формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры после РКУП обеспечило многократное снижение величины массового износа материала по сравнению с исходным крупнозернистым состоянием. Дальнейшее диспергирование структуры при низкотемпературном отжиге после РКУП обусловило дополнительное снижение массового износа в 2,2 раза. Исследованы высотные параметры шероховатости и построены опорные кривые поверхностей трения. Рост износостойкости стали с нано-, субмикронной структурой связан с образованием рельефа с меньшими колебаниями параметров Ra и Rz; график опорных кривых имеет большую длину опорной поверхности, происходит оптимизация площадей вершин и впадин для заданных условий трения.

Ключевые слова: низколегированная сталь, равноканальное угловое прессование, наноструктура, износостойкость, поверхность трения, шероховатость

**INCREASING OF WEAR RESISTANCE AND RELIEF OF THE FRICTION
SURFACE OF THE FERRITE-PEARLITIC STEEL NANOSTRUCTURED
BY SEVERE PLASTIC DEFORMATION**

Yakovleva S.P., Maharova S.N., Vinokurov G.G., Mordovskoy P.G., Struchkov N.F.

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, e-mail: mordov@yandex.ru

We investigated the wear resistance of the steel 09G2C after the bulk nanostructuring using a severe plastic deformation by equal-channel angular pressing (ECAP) at 20°C and subsequent low-temperature annealing at 350 and 450°C. It is shown that formation of the ultrafine-grained structure after ECAP provided the multiple decreasing of the mass wear compared with the initial coarse-grained state. Further dispersion of structure during low temperature annealing after ECAP caused to additional reduction of the mass wear 2.2 times. Roughness parameters and supporting curves of the friction surfaces were investigated. The growth of wear resistance of the steel with nano-, submicron structure connected with the formation of relief with less fluctuations in parameters of Ra and Rz; supporting curves have a long supporting surface, the effective areas of peaks and valleys for the preset conditions of the friction.

Keywords: Low alloy steel, equal channel angular pressing, nanostructure, wear resistance, friction surface, roughness

Структурированию металлов методами мегапластической деформации, в частности, РКУ прессованием в последние годы уделяется достаточно широкое внимание. Но по-прежнему остаются неясными многие аспекты поведения таких материалов при различных внешних нагрузках. Практика промышленного использования РКУП требует более полных сведений об изменении строения и свойств наноструктурированных материалов в процессе последующей эксплуатации, в том числе в условиях контактного нагружения.

Материалы и методы исследования

При реализации РКУП заготовка продавливается через стальную матрицу с двумя каналами с одинаковыми поперечными сечениями, пересекающимися под углом Φ , обычно равном 90° [1, 2, 3]. Площадь поперечного сечения образца, подвергнутого прессованию, практически не меняется.

Исследования проведены на широко применяемой в условиях холодного климата стали 09Г2С. Химический состав стали 09Г2С: С – 0,09; Si – 0,64; Mn

– 1,26; P – 0,007; S < 0,003; Cr-0,08; Ni-0,1; Al-0,02; Cu-0,14; V-0,002; Nb-0,01; Ti-0,013. Заготовки стали 09Г2С диаметром 20 мм и длиной 100 мм прессовали на установке для холодного РКУП при 20°С с углом пересечения каналов $\Phi = 90^\circ$. РКУП проводили с двумя циклами прессования по маршруту Вс (поворот на 90° после каждого цикла прессования), после РКУП образцы подвергли низкотемпературному отжигу при 350 и 450°С с выдержкой в течение 1 часа (ТО).

Микроструктура стали 09Г2С в исходном состоянии ферритно-перлитная, размер зерна феррита колеблется в пределах 4...35 мкм (средний диаметр 10 мкм). Микроструктура после РКУП состоит из распределенных в деформированной ферритной матрице карбидов диаметром ~300...500 нм [4]. Средний размер ферритных областей, свободных от перлита, равен ~5 мкм. При термической обработке материала после проведенного РКУП размер ферритных площадок уменьшается, продолжается процесс диспергирования карбидов, сопровождающийся их сфероидизацией и расщеплением; размер карбидов – первые десятки нм [4].

Механические свойства полученных образцов приведены в табл. 1 [5,6]. Для сравнения даны значения механических свойств стали 09Г2С согласно ГОСТ 19281-89. РКУП обусловило почти

трехкратное повышение предела текучести σ_T и предела прочности σ_B по сравнению с исходным состоянием. Сближение этих показателей является весьма характерным для сталей в высокопрочном состоянии. Резкое увеличение прочности считается след-

ствием и свидетельством перехода в УМЗ структуру и НС. Наибольшее значение прочности имеет образец после холодного РКУП и последующего нагрева до 350 °С, за ним – образец после холодного РКУП без нагрева.

Таблица 1

Прочностные свойства стали 09Г2С после различных видов обработки

Режимы обработки	σ_T , Па	σ_B , Па	δ , %
Горячекатаное состояние или термообработка (ТО) по ГОСТ 19281-89	325	470	21
РКУП при 20 °С, без ТО	930	1300	4
РКУП при 20 °С, отжиг при 350 °	985	1400	3
РКУП при 20 °С, отжиг при 450 °	850	1195	4
РКУП при 350 °С	910	1000	4,8

Методика исследования. Трибологические испытания по схеме трения «диск-колодка» проводили в условиях трения скольжения со смазкой машинным маслом на серийной машине трения СМЦ-2; контактная площадь образца 5×10 мм. Контртело представляло собой диск из порошка ПР-Н70Х17С4Р4 с добавлением 0,2% $CoAl_2O_4$ (Co – 35,1%; Al – 22,1%; O_2 – 41,4%) с микротвердостью 9220 МПа, диаметр диска 0,05 м, высота 0,01 м. Режимы испытаний: нагрузка 170 Н, частота вращения вала – 5 об/с, путь трения 5600 м с шагом 700 м, трение с граничной смазкой. Профилометрия поверхности трения образцов выполнена с помощью профилометра SJ-201. Массовый износ определялся весовым методом.

Опорные кривые строили в относительных координатах, когда по оси абсцисс откладывается относительная опорная длина профиля $tp = \sum l_i/l$, а по оси ординат – деформация выступов $\varepsilon = a_i/R_{max}$ (согласно ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики») [6].

Интенсивность износа высчитывалась по формуле $I = \Delta m/L$, где Δm износ образца, равный $m_i - m_{i+1}$, т.е. разность массы до и после испытания образца, L – пройденный образцом путь трения.

Результаты исследования и их обсуждение

Износостойкость ферритно-перлитных сталей определяется комплексом физико-

механических характеристик, зависящих от количества и дисперсности структурно-свободного феррита, размера и формы карбидных частиц, деформационного поведения, сопротивления возникновению микротрещин. Повышению износостойкости способствуют: рост твердости феррита, оптимальное распределение дисперсных частиц карбидной фазы и т.д. [7] Появление наноразмерных элементов в субмикроструктурной структуре значительно улучшило износостойкость: по массовому износу – более чем в 2,5 раза по сравнению с УМЗ структурой, полученной РКУП без ТО. На рис. 1 показан массовый износ образцов, обработанных РКУП и ТО (график для исходного образца не показан, т.к. значения массового износа крупнозернистого образца в десять и более раз превосходят значения для УМЗ образцов). Лучшей износостойкостью обладает сталь, обработанная по режиму РКУП с низкотемпературным отжигом при 350 °С, для которой на стадии приработки происходит снижение массового износа более чем в 4,7 раза по сравнению с образцом после РКУП без ТО.

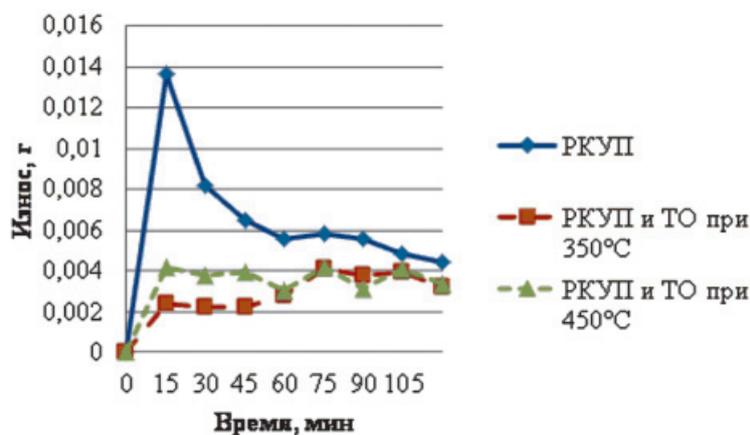


Рис. 1. Массовый износ образцов после РКУП и ТО

На рис. 2 показано изменение шероховатости Ra в процессе трения образцов в исходном крупнозернистом состоянии и после РКУП с последующей термической обработкой. Следует отметить колебательный характер изменения параметра Ra для поверхности трения всех образцов по всему пути трения, что объясняется цикличностью процесса трения: упрочнения (наклеп)

и разупрочнения (разрушение поверхности и удаление частичек износа) поверхности трения. Изменение значений Ra для образцов после РКУП без ТО и с ТО при 450°C наиболее монотонно убывающее, что может быть связано с более направленной и интенсивной по сравнению с исходным образцом самоорганизацией структуры под воздействием трибонагрузок.

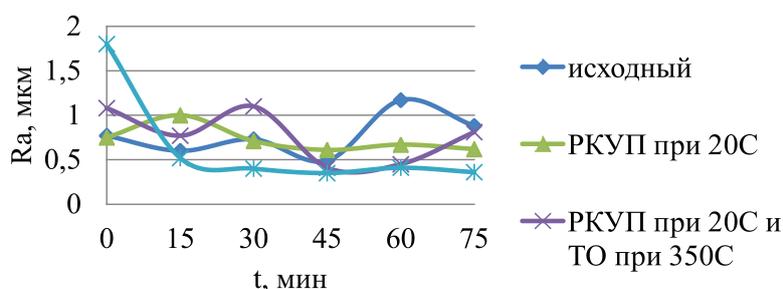


Рис. 2. Изменение Ra образцов по пути трения в зависимости от термомеханической обработки

Оценка шероховатости поверхности только по высоте неровностей и среднему арифметическому отклонению (Rz и Ra) является недостаточной, т.к. при одинаковом значении Rz и Ra профиль поверхности может иметь различную форму, что существенно влияет на условия трения. Например, малое количество высоких вершин снижает фактическую площадь контакта, а большое количество средних вершин увеличивает площадь контакта.

Известно, что реальный вид поверхности трения износостойкого материала должен иметь оптимальную величину фактической площади контакта, которая в неявном виде описывается длиной опорной поверхности и величиной площади вершин на графиках опорных кривых (рис. 3). Чем больше длина опорной поверхности трения, тем меньше вероятность появления очагов контактного разрушения, образования надиров и т.д. Рельеф поверхности трения также должен обладать достаточным размером впадин, которые необходимы, например, для удержания смазки на поверхности трения: слишком большая величина впадин способствует стеканию масла с поверхности трения, а малая величина препятствует эффективному маслоудержанию, что приводит к сухому трению скольжения и, как следствие, увеличению износа.

На рис. 3 показаны графики опорных кривых для образцов без термомеханической обработки в исходном состоянии и после РКУП при различных режимах с интервалом трения 15, 30, 45, 60 и 75 минут. Также на рис. 3 показаны типичные профилограммы поверхности трения после 45 ми-

нут трибоиспытаний. Относительная длина опорной поверхности, площади вершин и впадин исследуемых образцов приведены в табл. 2. Исходный крупнозернистый образец имеет наименьшее значение опорной поверхности, что является следствием особенностей рельефа поверхности с большим количеством вершин и впадин. Данный профиль поверхности имеет малую фактическую площадь контакта, что вызывает более интенсивное оттеснение материала, разрушение поверхностного слоя и удаление частичек износа в местах фактического контакта под действием сил трения, т.е. происходит дальнейшее образование новых вершин и впадин.

Меньшую площадь вершин и впадин имеют образцы после РКУП, т.е. поверхность является более гладкой и близкой к равновесной шероховатости. Обработка РКУП и отжиг при 350°C дали наибольшее относительное значение опорной поверхности (85%) изнашиваемого образца, малое значение площади вершин (0,1 мкм²) и достаточное значение площади впадин (0,12 мкм²).

Снижение высотных параметров шероховатости, увеличение длин опорных кривых поверхностей трения, оптимизация площадей вершин и впадин для заданных условий трения указывают на формирование в активном слое структур, обеспечивающих повышение сопротивления материала процессам трибодеструкции.

Выводы

1. Трибологические испытания в условиях трения-скольжения показали, что

равноканальное угловое прессование стали 09Г2С при 20°C с последующим низкотемпературным отжигом, обуславливающее появление структур в виде субмикроструктурной ферритной матрицы, армированной ультрадисперсными частицами карбида, обеспечило снижение величины массового износа более чем в 10 раз по

сравнению с исходным крупнозернистым состоянием материала. Последующий низкотемпературный отжиг вызвал дальнейшее диспергирование ферритной матрицы и карбидов (размер карбидов составляет первые десятки нанометров), что обеспечило дополнительное снижение массового износа в 2,2 раза.

Таблица 2

Параметры шероховатости образцов после 45 мин трения

Режимы обработки	Относительная длина опорной поверхности, %	Площадь вершин, мкм ²	Площадь впадин, мкм ²
Исходное состояние	72 ± 6	0,18 ± 0,11	0,20 ± 0,04
РКУП при 20°C, без ТО	82 ± 2	0,10 ± 0,03	0,17 ± 0,04
РКУП при 20°C, ТО при 350°C	85 ± 4	0,10 ± 0,06	0,12 ± 0,05
РКУП при 20°C, ТО при 450°C	84 ± 6	0,09 ± 0,05	0,07 ± 0,02

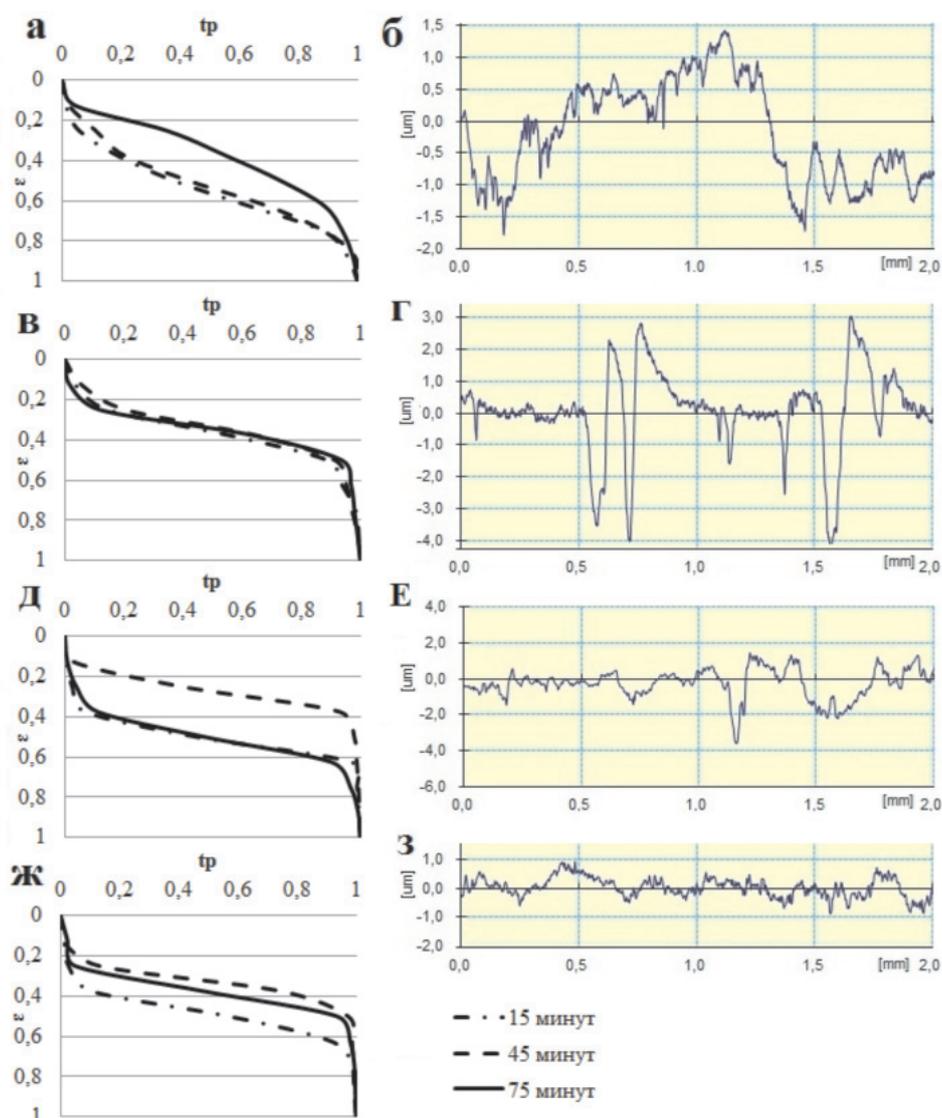


Рис. 3. Графики опорных кривых шероховатости после 15, 45 и 75 мин трибоиспытаний (а – исходное состояние; в – РКУП; д – РКУП и ТО350°C; ж – РКУП и ТО450°C) и профиль поверхности износа после 45 мин трибоиспытаний (б – исходное состояние; в – РКУП; е – РКУП и ТО350°C; ж – РКУП и ТО450°C)

2. Исследование высотных параметров шероховатости и опорных кривых поверхностей трения показало, что рост износостойкости стали 09Г2С с нано-, субмикронной структурой, сформированной при РКУП и последующей термической обработке, связан с образованием рельефа с меньшими колебаниями параметров Ra и Rz; график опорных кривых имеет большую длину опорной поверхности, происходит оптимизация площадей вершин и впадин для заданных условий трения.

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
2. Валиев Р.З. Развитие равноканального углового пресования для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов // *Металлы*. – 2004. – № 1. – С. 15–22.
3. Добаткин С.В., Одесский П.Д., Пиппан Р., Рааб Г.И., Красильников Н.А., Арсенкин А.М. Теплое и горячее равноканальное угловое пресование низкоуглеродистых сталей // *Металлы*. – 2004. – № 1. – С. 110–119.
4. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Борисова М.З. Образование наноразмерных элементов структуры в стали 09Г2С при низкотемпературном отжиге после интенсивной пластической деформации // *Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. материалов III межд. конференции (Москва, 12-13 окт. 2009г.)*. – М., 2009. – Т. 1. – С. 256–257.
5. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г. Комплексное повышение эксплуатационных свойств низколегированной стали путем объемного наноструктурирования // *Успехи современного естествознания*. – 2011. – № 6. – С. 47–48.
6. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах: учеб. для вузов. – Минск: Выш. шк., 1999. – 374 с.

7. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г., Борисова М.З., Винокуров Г.Г. Износостойкость и поверхность трения низколегированной стали с разным размером зерна // *Металлургия машиностроения*. – 2011. – № 4. – С. 26–29.

References

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostructurnye materialy poluchinye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey [Nanostructured materials produced by severe plastic deformation]. Moscow, Logos, 2000. 272 p.
2. Valiev R.Z. *Metally –Metals*, 2004, no. 1, pp. 15–22.
3. Dobatkin S.V., Odesskiy P.D., Pippan P., Raab G.I., Krasilnikov N.A., Arsenkin A.M. *Metally –Metals*, 2004, no. 1, pp. 110–119.
4. Yakovleva S.P., Maharova S.N., Borisova M.Z. Sbornik materialov III mezhdunarodnoy konferentsii «Deformatsiya Irazrusheniemateria lovinanomaterialov» (Soursbook IIIth International Conference «Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials»). Moscow, 2001, no. 1, pp. 256–257.
5. Yakovleva S.P., Maharova S.N., Mordovskoy P.G. *Uspekhii Sovremennogo Estestvoznaniya*, 2011, no. 6, pp. 47–48.
6. Bogdanovich P.N., Prushak V.Ya. *Trenieiznosv mashinakh [Friction and wear in machines]*. Minsk, High school, 1999. 374 p.
7. Yakovleva S.P., Maharova S.N., Mordovskoy P.G., Borisova M.Z., Vinokurov G.G. *Metallurgiyamashinostroeniya Metallurgy of Machinery Construction*, 2011, no. 4. pp. 26–29.

Рецензенты:

Ишков А.М., д.т.н., профессор, зав. отд. ритмологии и эргономики северной техники, Федеральное государственное учреждение науки «Якутский научный центр» Сибирского отделения РАН, г. Якутск;

Ткач С.М., д.т.н., директор, ФГБУН «Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН», г. Якутск.

Работа поступила в редакцию 05.12.2013.