

УДК 620.186: 620.17

UDC 620.186: 620.17

**ПРОЧНОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ,
УПРОЧНЕННОЙ НАНОРАЗМЕРНЫМИ
ВЫДЕЛЕНИЯМИ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ**

**STRENGTH AND WEAR-RESISTENCE OF
THE LOW-ALLOYED STEEL HARDENED
WITH NANOSCALE PARTICLES OF THE
CARBIDE PHASE**

Яковлева Софья Петровна
д.т.н., профессор, зав. отд. материаловедения

Yakovleva Sofia Petrovna
Dr.Sci.Tech., professor, Head of the material science
department

Махарова Сусанна Николаевна
к.т.н., в.н.с.

Makharova Susanna Nikolaevna
Cand.Tech.Sci., leading researcher

Борисова Мария Захаровна
к.т.н., с.н.с.
*Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия*

Borisova Maria Zakharovna
Cand.Tech.Sci., senior researcher
*Institute of the physical-technical problems of the
North, Siberian branch of the RAS, Yakutsk, Russia*

Показано, что комбинирование холодного
равноканального прессования с
низкотемпературным отжигом приводит к
образованию в стали 09Г2С
субмикроструктурной ферритной матрицы,
упрочненной наноразмерными выделениями
карбидной фазы, что приводит к достижению
высокопрочного состояния, а также значительное
снижение интенсивности изнашивания материала

It is shown that the combination of the cold equal
channel pressing with low-temperature annealing
leads to the formation of a sub-microcrystalline
ferritic matrix hardened with nanoscale particles of the
carbide phase in steel 09G2S. Resulting structure
leads to the achievement of the high-strength state, as
well as a significant reduction of the wear intensity of
the material

Ключевые слова: РАВНОКАНАЛЬНОЕ
УГЛОВОЕ ПРЕССОВАНИЕ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ, КОНСТРУКЦИОННАЯ
СТАЛЬ

Keywords: EQUAL CHANNEL ANGULAR
PRESSING, STRENGTH, WEAR-RESISTANCE,
CONSTRUCTION STEEL

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание материалов обладающих высокой прочностью и износостойкостью является одной из приоритетных задач материаловедения. Проблема заключается в том, что зачастую высокая прочность сопровождается повышением хрупкости материала и в процессе износа происходит хрупкое разрушение и выкрашивание частиц с поверхностей трения. Поскольку многие эксплуатационные свойства машин и механизмов в значительной степени определяются контактным взаимодействием деталей, то необходим не только анализ изменения прочностных характеристик материала, но и анализ изменения износостойкости. Известно, что формирование нано- и субмикроструктур приводит к значительному изменению свойств материалов. Еще в середине прошлого века было установлено, что

простым и эффективным путем измельчения структуры является интенсивная пластическая деформация (ИПД). Методы ИПД открывают широкие перспективы в управлении свойствами и в формировании структуры конструкционных материалов. С помощью одного из методов ИПД - равноканального углового прессования (РКУП), возможно объемное наноструктурирование, т.е. получение заготовок с заданной по всему объему структурой [1]. В ходе РКУП заготовка проходит через специальную матрицу с пересекающимися под углом каналами, угол пересечения составляет от 90 до 120°. При этом РКУП сталей обычно проводят при температурах $\sim 0,3 \dots 0,4 T_{пл}$ [2]. При снижении температуры деформирования до комнатной интенсивность диспергации структуры возрастает, но при этом возрастает и наклеп материала, что в свою очередь приводит к разрушению образца уже после 3-4 циклов «холодного» РКУП. Таким образом, число циклов при холодном РКУП должно быть минимальным. Но так как ИПД приводит не только к диспергации структурных составляющих, но и к значительному росту плотности дефектов упаковки в материале, то полученные образцы хоть и обладают высокой прочностью, но при этом зачастую малопластичны. Для снижения плотности избыточных дислокаций необходимо подвергнуть образцы кратковременному отжигу, для предотвращения рекристаллизационных превращений материала температура обработки материала после РКУП должна лежать в диапазоне 300 ... 500°C, так как температура начала рекристаллизации наноструктурированных ИПД материалов на $(0,1-0,2) \cdot T_{пл}$ ниже чем температура рекристаллизации их крупнозернистых аналогов.

2. Материалы и методика экспериментов.

Материалом исследований была выбрана сталь 09Г2С, химический состав приведен в таблице 1. Цилиндрически образцы были деформированы при температуре 20°C (так называемое «холодное»

РКУП); угол пересечения каналов 90° , число циклов 2. Малое число циклов обусловлено стремительным упрочнением материала и чрезвычайной сложностью дальнейшего деформирования. Для снятия избыточных напряжений материала образцы после РКУП отжигали в течение 1 часа при температурах 350 и 450°C .

Таблица 1. Химический состав стали 09Г2С, масс%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	V	Nb	Ti
0,09	0,64	1,26	0,007	< 0,003	0,08	0,1	0,02	0,14	<0,002	0,01	0,013

3. Результаты исследований и их обсуждение.

В ходе ИПД происходит рост плотности дислокаций по границам между ферритом и цементитом, что и инициирует источники дислокаций в цементите, перемещение которых «разрезает» его пластины. В результате двух циклов РКУП формируется фрагментированная ферритная структура со сферическими включениями цементита. Измельчение структурных составляющих исходной ферритно-перлитной структуры стали 09Г2С происходит за счет дробления перлита и его «размытия» в деформирующейся ферритной матрице в виде мелких обособленных глобул. Уменьшение среднего размера зерен феррита с исходного 10 мкм до 1,9 мкм, т.е. более чем в пять раз ведет к резкому скачку прочности материала. Сформированная в результате интенсивной пластической деформации субмикроструктурная структура, помимо малого размера зерна, характеризуется крайне неравновесным состоянием границ зерен, что является причиной наличия в приграничной зоне дальнедействующих полей упругих напряжений и искажения кристаллической решетки. Подобные структуры обеспечивают высокую прочность металлов и сплавов после ИПД, но при этом упрочнение сопровождается одновременно сильным снижением у них величины равномерной деформации, когда деформация теряет устойчивость и на растягиваемом образце возникает область локализации деформации (шейка). В результате

разрушение наноматериала наступает на начальной стадии его деформации. Отсутствие необходимого запаса пластичности является существенным недостатком нано- и субмикроструктурных металлов и сплавов и служит препятствием для их практического применения. В ходе последующего нагрева наблюдаются превращения, не характерные для материала в обычном крупнозернистом состоянии. При нагреве до температур 350 и 450°C размер ферритных площадок уменьшается, продолжается процесс диспергации карбидов (рис. 1), происходит их растворение с диффузией углерода в феррит, сопровождающееся сфероидизацией и рассредоточением цементитных включений.

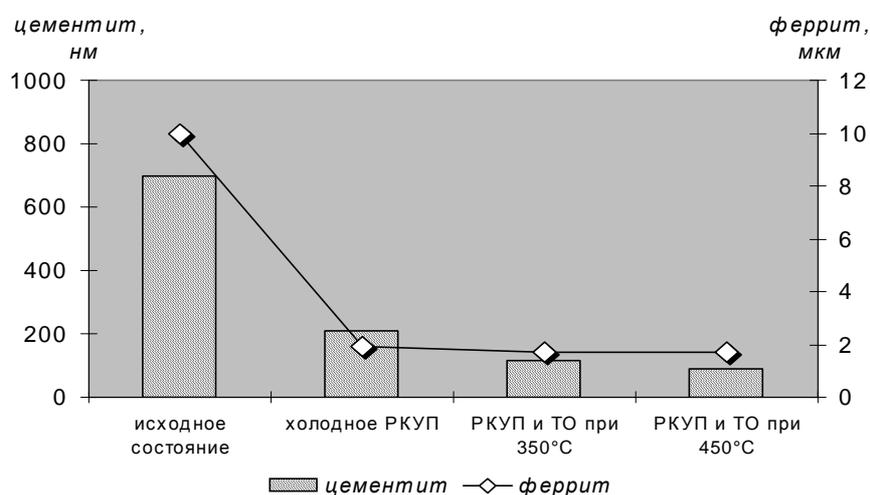


Рис. 1. Изменение размера структурных составляющих стали 09Г2С

Таким образом, в результате РКУП и последующих отжигов, имеется двухкомпонентная структура, состоящая из ультрамелкозернистого (УМЗ) феррита и наноструктурного цементита, различающимися не только размером зерен, но и значительно отличающимися по свойствам. Такое сочетание компонентов: твердых глобулярных включений и относительно мягкой матрицы, должно выгодно сказаться на механических свойствах материала.

Действительно, испытания на статическое растяжение показали, что по уровню предела прочности и предела текучести, сталь 09Г2С после обработки РКУП и отжига приближается к классу высокопрочных (рис.2).

Как видно, термообработка (ТО) при 350°C привел к трехкратному повышению предела текучести σ^T и предела прочности σ^B по сравнению с аналогичными характеристиками стали после стандартной обработки. Резкое увеличение прочности считается следствием и свидетельством перехода структуры в субмикро-, нанокристаллическое состояние.

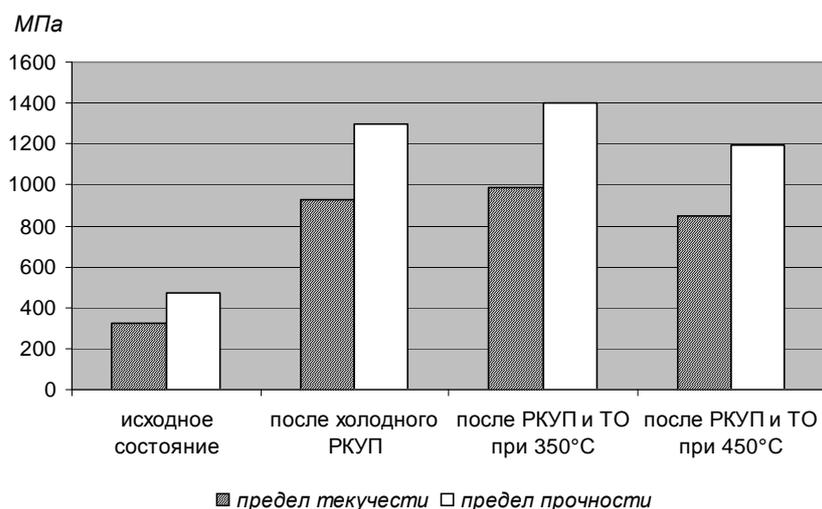


Рис. 2. Прочность образцов стали 09Г2С

Изменения микростроения при нагреве образцов после холодного РКУП влияют и на показатели микротвердости стали (рис. 3), которые возрастают, достигая максимума при 350°C, а затем снижаются. Приращение микротвердости после отжига при низкотемпературном отжиге обусловлено, в частности, перераспределением углерода в тело феррита и дополнительным измельчением цементитных включений.

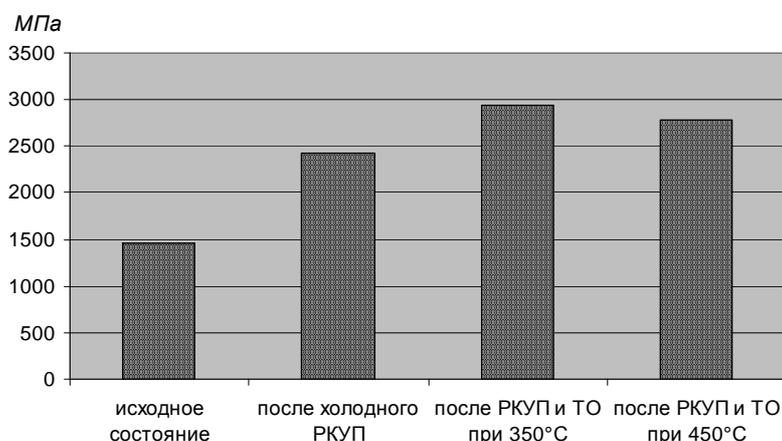


Рис. 3. Микротвердость образцов стали 09Г2С в различных структурных состояниях

Анализ изменения износостойкости образцов стали 09Г2С в процессе трения скольжения показал значительное снижение износа после ТО образцов, структурированных холодным РКУП (рис.4). Снижение износа на стадии приработки свидетельствует о более оптимальных физико-механических свойствах стали в состоянии РКУП+ТО при 350°С. Появление наноразмерных элементов в исходной субмикроструктурной структуре значительно улучшило показатели износостойкости: по массовому износу – в 2,5...2,75 раза; по интенсивности изнашивания – более чем в 2 раза. Лучшую износостойкость продемонстрировала сталь, обработанная по режиму РКУП+ТО при 350°С, для которой на стадии приработки снижение интенсивности изнашивания составило 3-4 раза. Улучшение общей износостойкости за счет увеличения ее показателей на стадии приработки весьма благоприятно, так как часто потери массы при приработке составляют главную долю общего массового износа.

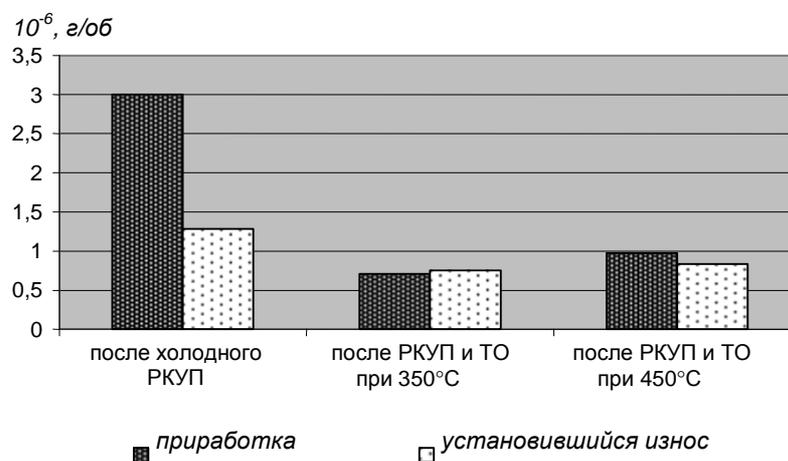


Рис. 4. Интенсивность изнашивания образцов стали 09Г2С в различных структурных состояниях

Рассмотрим процесс износа более подробно. Крагельский И.В. [3] выделяет в процессе трения три последовательных этапа: взаимодействие поверхностей, изменение поверхностей и разрушение поверхностей. При разрушении поверхности образуются частицы износа, их формирование во

многим сходно с усталостным разрушением материала. Поэтому, зачастую, для сталей с повышенной прочностью и твердостью характерны относительно низкие значения износостойкости, так как для области высоких значений твердости характерно хрупкое разрушение и в процессе износа происходит выкрашивание частиц с поверхности образца. В случае вязкого разрушения формирование и отделение элементарной частицы изнашивания происходит в результате полидеформационных процессов [4].

Для определения характера износа материала после холодного РКУП и последующих отжигов нами были исследованы профили поверхностей износа образцов в процессе испытаний. Анализ рельефа поверхностей трения показал, что характер износа образцов непосредственно после холодного РКУП отличается от характера износа термообработанных образцов. На поверхности износа нетермообработанного образца формируется более грубый рельеф дорожек трения с вырывами, наростами, отслоениями, наволакиваниями материала (рис. 5 *а, б*), что свидетельствует об адгезионном характере изнашивания. По сравнению с другими образцами, много прерывистых бороздок и рисок что указывает на сильную чувствительность металла к мелким абразивным частицам контртела. Каждый новый цикл испытаний на износ сопровождается деформацией металла и его сдвигом, а так как материал после холодного РКУП перенасыщен избыточными дислокациями, то дополнительная деформация приводит к переходу пластического деформирования в хрупкое разрушение.

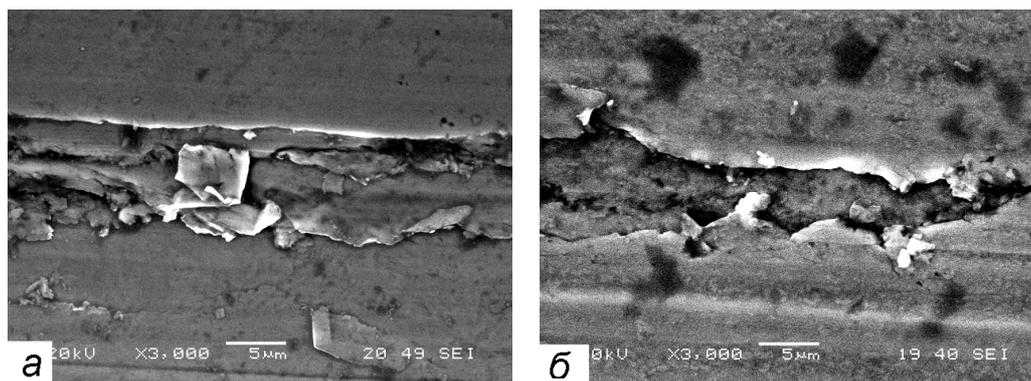


Рис. 5. Типичные участки поверхности износа образцов после холодного РКУП после 9000 (а) и 36000 (б) циклов трения

Данные, полученные с помощью профилометра SJ-201P, показали что, профилограммы поверхностей трения образцов стали 09Г2С после РКУП и последующих термообработок отличаются друг от друга по уровню сглаженности. Наибольшие значения параметра Rz , т.е. высот микронеровностей профиля поверхности трения, принадлежат образцу после холодного РКУП (рис. 6). Высокие значения Rz неотожженного образца подтверждают разрушение материала вследствие абразивно-механического микрорезания с адгезией и выкрашивания. Большая неравномерность профиля поверхности трения может быть следствием отслоения металла в ходе испытания на износ и вырывов частиц материала с поверхности износа.

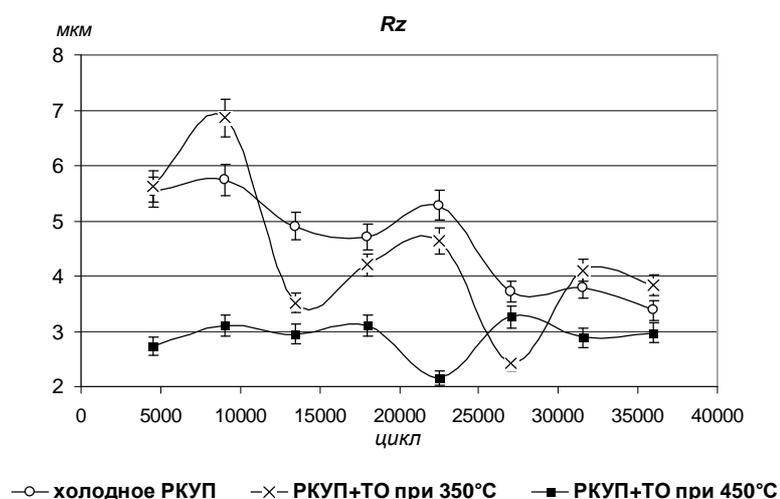


Рис. 6. Высота микронеровностей профиля образцов стали 09Г2С в ходе испытаний на износ

Наиболее сглаженный рельеф графика Rz образца после ТО при 450°C говорит о полидеформационном характере износа, т.е. основным механизмом отделения частиц износа в течение всего времени испытаний осталось пластическое оттеснение. Тогда как образцу отожженному при 350°C соответствует наиболее неравномерный изменение Rz . Немонотонное изменение высотных параметров профиля образца РКУП+ 350°C по пути трения может свидетельствовать о том, что самоорганизация структуры под воздействием трибонагрузок для данного материала и при данных условиях испытаний отличается от диссипативных процессов при износе двух других типов структурного состояния материала.

Рассматривая поверхность трения образца после РКУП + ТО при 350°C (рис. 7, а) можно сказать что рельеф поверхности выражен слабо, имеются относительно ровные дорожки трения и тонкие бороздки. Элементы пластического оттеснения на поверхностях развиты слабо. Местами видны участки со следами глубинного расслоения и вырывания в которых участвуют силы адгезионного взаимодействия. Вместе с тем такие участки могут быть следствием локализации деформации, приводящей к послойной потере устойчивости объемов материала. Зигзагообразная форма изменения высотных параметров шероховатости (рис. б) является следствием рельефообразующих и сглаживающих рельеф процессов: закатывание образовавшихся ранее борозд и раскатывание гребней пластически оттесненного металла. Появление плосковершинных микронеровностей означает нарастание опорной поверхности между образцом и контртелом, что уменьшает контактные давления и деформации и на определенное время снижает интенсивность изнашивания, что объясняет лучшую износостойкость металла, наноструктурированного по режиму РКУП + ТО при 350°C . Такая обработка обеспечила благоприятное сочетание высокой твердости (этим

сдерживается интенсивность пластической деформации поверхностного слоя) и способности материала сопротивляться трещинообразованию и формированию частиц износа. Дополнительное упрочнение субмикронной ферритной матрицы относительно равномерно распределенными наночастицами карбидной фазы привело к многократному росту износостойкости стали 09Г2С.

Анализ поверхностей трения образца после РКУП и ТО при 450°C (рис. 7, б) подтвердил что релаксация напряжений от трибонагрузки происходит в основном пластическими сдвигами. В целом формирование субмикронных структур с дисперсными частицами цементита уменьшает адгезионную составляющую коэффициента трения и склонность стали к схватыванию. Но степень износа образца после ТО при 450°C все же несколько выше, чем у образца после ТО при 350°C, таким образом вполне закономерно предположить, что дальнейшее увеличение температуры отжига приведет к разупрочнению материала.

В целом на поверхностях износа образцов стали 09Г2С наблюдаются все основные механизмы повреждения контактных зон: упругое и пластическое оттеснение, микрорезанье абразивными частицами контртела, выкрашивание, отслоение и вырывы. Термообработка образцов после РКУП привела к снижению адгезионного и деформационного взаимодействия на площадках контакта и улучшила несущую способность металла за счет уменьшения очагов схватывания, обуславливающих адгезионное разрушение поверхности трения.

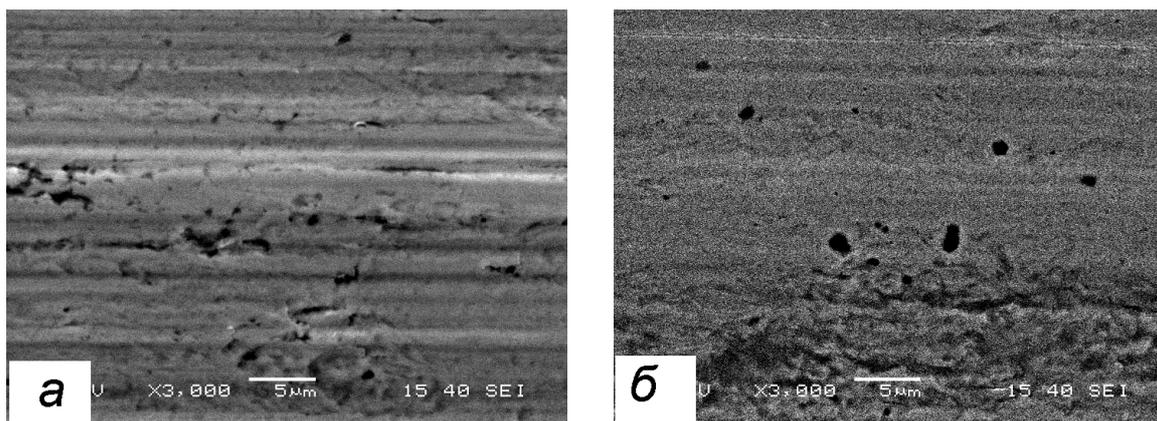


Рис. 7. Типичные участки поверхностей трения образцов стали 09Г2С после холодного РКУП и ТО при 350 (а) и 450°C (б)

Из вида корреляционных зависимостей и их изменения по пути трения исследуемых образцов видно, что у образцов после РКУП области взаимного влияния процессов, сопровождающих изнашивание, локализованы в пределах ~ 100 мкм (рис. 8). У стали после РКУП+ТО при 350°C с микро- и наноразмерными глобулярными включениями цементита взаимосвязанность и масштаб взаимосвязанных участков активного слоя значительно выше: $\sim 250...300$ мкм. Это означает, что трибонагрузка воспринимается более обширными зонами активного слоя поверхности трения. Для стали после РКУП + ТО при 450°C наблюдается изменение радиуса автокорреляционной функции (АКФ) по пути трения. Первоначально радиус АКФ имеет значение, равное ~ 250 мкм, но по мере приработки и выхода на стационарную шероховатость, снижается до 100 мкм (рис. 8).

Полученные результаты указывают на то, что при протекании процессов деформирования и повреждения поверхностных слоев образцов в них происходит самоорганизация структуры, обеспечивающая более или менее эффективную диссипацию энергии. Определяющим фактором для степени износа является не деформирование и деструкция на уровне отдельных зерен материала, а формирование неких мезоскопических

объемов, воспринимающих трибонагрузку, от масштаба которых зависит сопротивление изнашиванию. Очевидно, что структура материала РКУП + ТО при 350°C обладает наибольшей стабильностью при использованных условиях испытаний, в материале РКУП + ТО при 450°C в свою очередь идет образование устойчивых вторичных структур по механизму структурной приспособляемости, а структура материала после холодного РКУП более ограничена в возможности адаптации к условиям истирания вследствие низкой способности к диссипации трибонагрузок и как следствие обвальный характер разрушения поверхности трения.

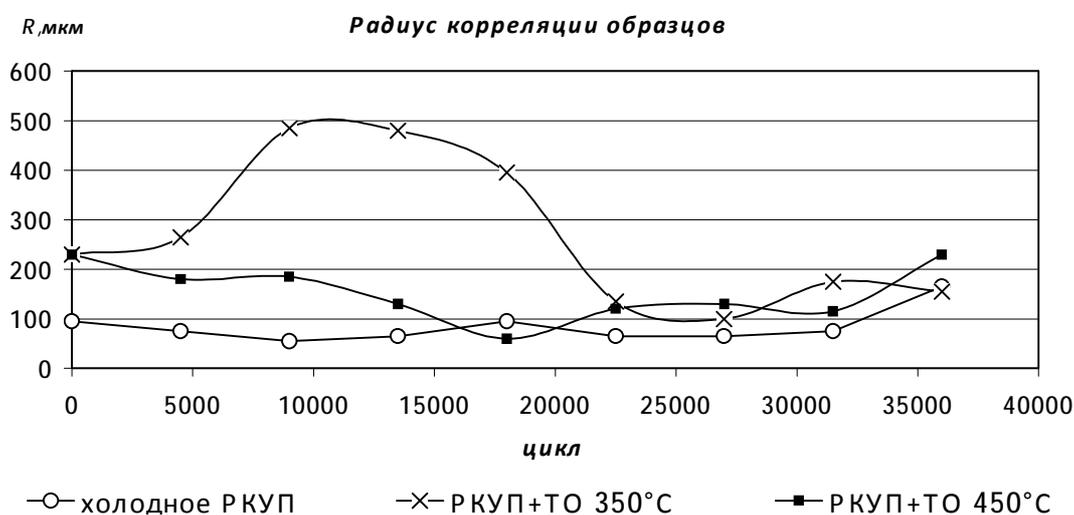


Рис. 8. Изменение радиуса автокорреляционных функций профилограмм поверхностей трения в процессе износа образцов стали 09Г2С в различных структурных состояниях

В ранних работах [5-8] отмечалось, что по результатам проведенных исследований особенностью наноструктурированной стали 09Г2С при однократном нагружении является объемное восприятие нагрузки, вследствие чего отодвигается момент локализации деформации и достижения критических величин при которых происходит разрушение материала. Сильноориентированные субзеренные и межкристаллитные границы в сочетании с карбидной нанофазой представляют собой

своеобразный прочностной каркас, обеспечивающий распределение действующих нагрузок по всему объему образца.

Таким образом, выявлены деформационно-термические условия обработки конструкционной стали 09Г2С, в ходе которых формируется структура, обладающая высоким уровнем комплекса физико-механических характеристик, включая сопротивление изнашиванию в условиях трения скольжения.

4. ВЫВОДЫ

1. Деформационно-термические условия обработки стали 09Г2С холодным РКУП с последующим отжигом при 350 и 450°С привели к образованию специфичной структуры в виде субмикроструктурной ферритной матрицы, упрочненной наноразмерными цементитными частицами.
2. Проведенное при режиме «холодное РКУП + ТО 350°С» деформационно-стимулированное наноструктурирование стали 09Г2С обусловило переход ее в высокопрочное состояние: предел текучести σ^T и предел прочности σ^B при комнатной температуре увеличились втрое и составили соответственно 985 и 1400 МПа.
3. В результате диспергации структуры в ходе РКУП и последующего отжига при температурах 350 и 450°С наблюдается рост микротвердости в 1,6-2 раза. Максимальный прирост микротвердости отмечен после холодного РКУП и ТО при 350°С.
4. Исследование трибологических свойств в условиях трения скольжения стали 09Г2С в зависимости от уровня дисперсности ее структуры показало, что появление наноразмерных элементов в исходной субмикроструктурной структуре значительно улучшило износостойкость: массовый износ и интенсивность изнашивания

уменьшились более чем в 2 раза, причем на стадии приработки для материала, обработанного по режиму «холодное РКУП + термообработка при 350°С», снижение массового износа составило 2,7 раза, интенсивности изнашивания – 3,4 раза. Повышение общей износостойкости при росте ее значения на стадии приработки считается более благоприятным с позиций трибологии.

5. Основными механизмами повреждения контактных поверхностей образцов стали 09Г2С в трех исследованных структурных состояниях являются абразивно-механическое микрорезание с адгезией и пластическое отеснение, также наблюдаются выкрашивания, отслоения, вырывы. Присутствие микро- и наночастиц карбидной фазы ослабляет деформационное и адгезионное взаимодействие на площадках контакта, что повышает износостойкость путем сдерживания деформирования активного слоя, роста сопротивления материала к трещинообразованию и снижения склонности к схватыванию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
- 2 Borisova M.Z., Yakovleva S.P., Ivanov A.M Equal channel angular pressing, its effect on structure and properties of the constructional steel St3 – Solid State Phenomena, Vol. 114 (July 2006), pp. 97-100.
- 3 Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
- 4 Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов: Учебник для вузов. –М.: Недра, 1996. – 364 с
- 5 Яковлева С.П., Махарова С.Н., Борисова М.З. Интенсивная пластическая деформация как способ повышения сопротивления хрупкому разрушению низколегированной стали // Наука и образование. - 2006. - № 2 (42). - С. 56-58.
- 6 Яковлева С.П., Махарова С.Н., Борисова М.З. Структура, свойства и особенности разрушения низколегированной стали в субмикроструктурном состоянии // Металлы. - 2006. - № 4. - С. 51 - 55.
- 7 Yakovleva S.P., Makharova S.N., Sleptsov O.I., Borisova M.Z. Physical and mechanical properties of low-alloyed steel with nanosized structure elements // Rare Metals. – 2009. – V.28. – P. 906 – 908.
- 8 Яковлева С.П., Махарова С.Н. Механические свойства стали 09Г2С при низкотемпературном отжиге после холодного равноканального углового прессования / Изв. Самарского научного центра РАН. – 2010. - № 1 (2). – Т. 12 (33). – С.589-591.

REFERENCES

- 1 Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Ob#emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svojstva. – M.: IKC «Akademkniga», 2007. – 398 s.
- 2 Borisova M.Z., Yakovleva S.P., Ivanov A.M Equal channel angular pressing, its effect on structure and properties of the constructional steel St3 – Solid State Phenomena, Vol. 114 (July 2006), pp. 97-100.
- 3 Kragel'skij I.V. Trenie i iznos. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 480 s.
- 4 Vinogradov V.N., Sorokin G.M. Mehanicheskoe iznashivanie stalej i splavov: Uchebnik dlja vuzov. –M.: Nedra, 1996. – 364 s
- 5 Jakovleva S.P., Maharova S.N., Borisova M.Z. Intensivnaja plasticheskaja deformacija kak sposob povyshenija soprotivlenija hrupkomu razrusheniju nizkolegirovannoj stali // Nauka i obrazovanie. - 2006. - № 2 (42). - S. 56-58.
- 6 Jakovleva S.P., Maharova S.N., Borisova M.Z. Struktura, svojstva i osobennosti razrushenija nizkolegirovannoj stali v submikrokristallicheskom sostojanii // Metally. - 2006. - № 4. - S. 51 - 55.
- 7 Yakovleva S.P., Makharova S.N., Sleptsov O.I., Borisova M.Z. Physical and mechanical properties of low-alloyed steel with nanosized structure elements // Rare Metals. – 2009. – V.28. – P. 906 – 908.
- 8 Jakovleva S.P., Maharova S.N. Mehanicheskie svojstva stali 09G2S pri nizkotemperaturnom otzhige posle holodnogo ravnokanal'nogo uglovogo pressovanija / Izv. Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2010. - № 1 (2). – T. 12 (33). – S.589-591.