

УДК 621.789
DOI: 10.12737/20593

О.И. Шаврин, д.т.н.
(Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
426039, РФ, УР, г. Ижевск, ул. Студенческая, д.7)
E-mail: shavrin@istu.ru

Нанотехнологии в машиностроении*

Рассмотрены методы получения наноматериалов конструкционного назначения. Основное внимание уделено термомодеформационной обработке как методу формирования наноразмерной субструктуры.

Используя принципы термомодеформационной обработки, можно изготавливать высокопрочные пружины, валы различного назначения.

Ключевые слова: наноразмерность; субструктура; нанотехнология; пружины; валки; циклическая прочность.

O.I. Shavrin, D.Eng.
(Kalashnikov State Technical University of Izhevsk,
7, Studencheskaya Str., Izhevsk 426039, UR, Russia7)

Nanotechnologies in mechanical engineering

For the production of structural steel with a nanostructure there are used methods combined into five groups – powder metallurgy, amorphous state crystallization, intensive plastic deformation, surface and volumetric thermo-deformation treatment. The last method is the most effective one for products subjected to cyclic loads and destructed because of fatigue. A limited longevity at loads exceeding fatigue strength increases ten times and more. A thermo-deformation working is carried out at the production of cylindrical spiral springs, cylindrical parts – shafts, axles, mill rollers.

Keywords: nano-dimension; substructure; nanotechnology; springs; rollers; cyclic strength.

Связь понятий «реальный металл», деталь, конструкция и «нано» в любом сочетании – наноматериал, наночастицы, нанотехнология – не может быть отвлеченной, диктуемой только новизной и интересом к познанию неизвестного явления, но иметь вполне прагматическую цель – получить не просто наноматериал, металл с какими-то наноособенностями структуры, а реальную конструкцию, изделия машиностроения из такого материала. Известно, что получить материал с какими-то особенными свойствами – это одна проблема, а изготовить из него деталь и использовать её в конструкции – это другая проблема и не всегда реализуемая.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEF157714X0011.

Для конструкционных материалов и изделий, которые из них изготавливаются, под нанотехнологией принято понимать процессы формирования каких-либо элементов структуры, получающих размеры, соответствующие установленному требованию – менее 100 нм хотя бы в одном из направлений измерения.

Упрочняющее воздействие наноразмерных элементов структуры – торможение дислокаций, обеспечивающее повышение сопротивления деформации под действием напряжений. Такими элементами структуры могут быть границы зерен, дисперсные выделения карбидов, нитридов, карбонитридов и других, границы субзерен, образующихся в результате перестроения дислокаций, образовавшихся в ходе пластической деформации, применяющейся либо при производстве металла, либо при изготовлении деталей [1].

По результатам исследований [2 – 7] сфор-

мулированы методы получения нанометаллов конструкционного назначения. Их можно объединить в группы [1, 8]:

- порошковая металлургия (компактирование нанопорошков);
- кристаллизация аморфного состояния;
- интенсивная пластическая деформация;
- поверхностная и объемная термомеханическая обработка.

Первые четыре группы основываются на представлении, что процесс сопротивления деформации и разрушению контролируется размерами зерен или частиц нанопорошков. Пятый основывается на фактах зависимости сопротивления малым пластическим деформациям и разрушению при циклических нагрузках и вообще прочности от тонкой структуры зерен – ячеек, полигонов [9 – 10].

Создание технологий, реализующих методы получения конструкционных нанометаллов, реализуемых в машиностроении, актуально.

Рассматривая возможную связь понятия реальный металл, изделие из него и «нано» можно предложить своеобразный алгоритм рассмотрения проблемы:

1. Цель, которой нужно добиться. Целью может быть повышение конструктивной прочности. Конструктивная прочность – это и характер нагрузок (статические, ударные, циклические), температурные условия эксплуатации, соотношение уровня рабочих напряжений и характеристик прочности металла, состояние поверхности детали – наличие концентраторов напряжений и т.д.

2. Структурные факторы, определяющие уровень конструктивной прочности.

Сказанное приводит к выводу, что разрабатываемая схема реализации или получения «нано» в реальных металлах и конструкциях должна быть направлена на получение какой-либо определенной особенности структуры материала, которая будет определять работоспособность детали в условиях эксплуатации. Особо стоит вопрос о влиянии каких-либо наноразмерных изменений структуры материала у деталей, испытывающих циклические нагрузки, или, как говорят, работающих на усталость.

Для такого класса деталей из большого количества факторов, определяющих работоспособность деталей в условиях циклического нагружения можно выделить два структурных самостоятельных фактора: размеры элементов структуры и карбидных частиц, которые формируются технологией. Упрочняющая роль

дисперсности карбидов известна. Известно также и то, что при обычной закалке конструкционных сталей получение карбидов размерами 20...100 нм возможно.

Для деталей, работающих на усталость, наиболее важное значение для увеличения уровня разрушающих напряжений будет иметь размер элементов субструктуры. Это утверждение основывается на установленных фактах:

1. Процесс зарождения усталостной трещины происходит в результате образования критических скоплений дислокаций перед структурными барьерами.

2. Рабочие напряжения, инициирующие движение дислокаций, составляют долю от предела упругости.

3. При этих напряжениях эффективными барьерами для движения дислокаций становятся субграницы полигонов и ячеек внутри зерен. Дисперсность элементов субструктуры обеспечивает равномерное движение дислокаций и затрудненность формирования критических плотностей, увеличивающих количество циклов нагружения необходимых для этого [9].

Формирование такой структуры в конструкционных металлических материалах возможно технологическими методами.

Применительно к конструкционным сталям основой таких технологий могут быть комплексные процессы, использующие различные физические воздействия, например, термическую обработку и пластическую деформацию, осуществляемые в разной последовательности. Варианты таких технологий формирования полигональной субструктуры можно объединить в одно понятие – термомеханическая обработка (ТМО), рассматривая её как метод формирования наноразмерной структуры в конструкционных сталях.

Один из вариантов такой технологии может быть реализован на принципах высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО).

Но ВТМО, осуществляемая при производстве, например, проката по классической схеме в силу особенностей процесса (высокие температуры, дробность деформации и длительность) наноразмерность субструктуры стали не обеспечивает.

Для получения наноразмерной субструктуры нужно изменить параметры процесса и обеспечить управляемость ими. Изменение параметров процесса ТМО должно обеспечить [8]:

- минимизацию температуры при условии его скоротечности, но с обеспечением гомогенизации химического состава;

- уменьшение степени деформации;

- регулируемость охлаждения, включающего использование последеформационных выдержек. Длительность выдержек – величина переменная, зависящая от комплекса параметров процесса: температуры, степени деформации и её длительности.

Для реализации процесса ТДО необходимо специальное оборудование, на котором можно осуществлять процесс, производя заготовки или готовые детали, применяя её в качестве упрочняющей операции.

Исследование влияния процесса ТДО на формирование наноразмерной субструктуры и прочностные характеристики конструкционных сталей и деталей изделий машиностроения проводились на специальном оборудовании, позволяющем производить винтовые пружины по методу горячей навивки [5], проволоку и калиброванную сталь [8] и цилиндрические детали-валки, пальцы, оси ограниченной длины.

Во всех случаях нагрев заготовок металла осуществлялся токами высокой частоты (частота зависит от размеров заготовок). Деформация зависит от вида объекта.

При изготовлении пружин горячей навивки использовалась деформация гибки при формировании витка пружины, при производстве проволоки деформация волочением, калиброванной стали и цилиндрических деталей обкаткой с различными приводами вращения деформирующей валковой головки.

Исследования проводились на ряде сталей: 60С2А, 60С2ХФА, 51ХФА, 45, 40Х, 38ХС, 30ХГСН2А, 9Х, ШХ15.

Выбор марок сталей определялся областями их возможного применения при изготовлении деталей изделий машиностроения – пружин, осей, пальцев траков, валков и т.д.

Прочностные характеристики определялись при различных видах испытания и нагружения в зависимости от назначения и структурного состояния металла: растяжение, изгиб, циклические и контактные нагрузки.

Характеристики прочности и пластичности проволоки при растяжении определяли в соответствии с ГОСТ 10446–80 на универсальной машине с усилием $P_{max} = 100$ кН типа РЭМ-100, оснащенной встроенной системой управления. На этой же машине испытывались на изгиб образцы сталей 60С2А и 9Х в низкоотпущенном состоянии.

Характеристики прочности и пластичности калиброванной стали (сталь 60С2А, 38ХС, 45, 40Х) определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–73 на цилиндрических образцах диаметром 5 мм.

Тонкая структура сталей после ТДО исследовалась с помощью электронного микроскопа ЭМ-125 М при ускоряющем напряжении 100 кВ.

Заготовки под фольгу толщиной 0,4...0,5 мм отрезались на электроискровом станке. После механического утонения нарезанных заготовок до 0,05...0,10 мм на абразивных шкурках проводилось электролитическое травление в электролите (135 мл ледяной уксусной кислоты, 27 г хромового ангидрита, 7 мл воды).

Усталостная прочность проволоки после ТДО оценивалась по результатам испытания цилиндрических винтовых пружин, навитых из неё. Навивка производилась при комнатной температуре, отпуск после навивки при температуре 240...250 °С.

Винтовые пружины горячей навивки испытывались на усталость на резонансных стендах [5]. Контактная усталость образцов сталей 9Х и ШХ15 после ТДО определялась при контактном нагружении вращающихся образцов в виде роликов.

При статическом нагружении образцов сталей 60С2А, 9Х, ШХ15 было установлено, что при ТДО с применением индукционного нагрева, основной прирост прочности и при испытании на изгиб (низкоотпущенные образцы) и на растяжение получается уже при небольших степенях деформации – 10...15 %.

Степень деформации определялась по отношению площадей образцов до и после высокотемпературной деформации (рис. 1 – 3).

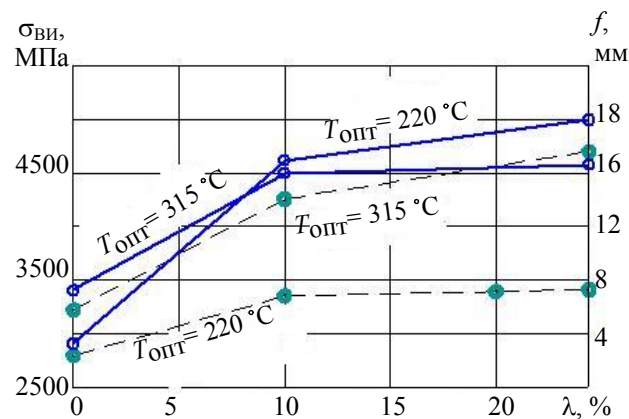


Рис. 1. Влияние степени деформации на свойства стали 60С2А. Испытание на изгиб. $T_{деф} = 1000$ °С; «—» $\sigma_{вн}$; «- - -» f

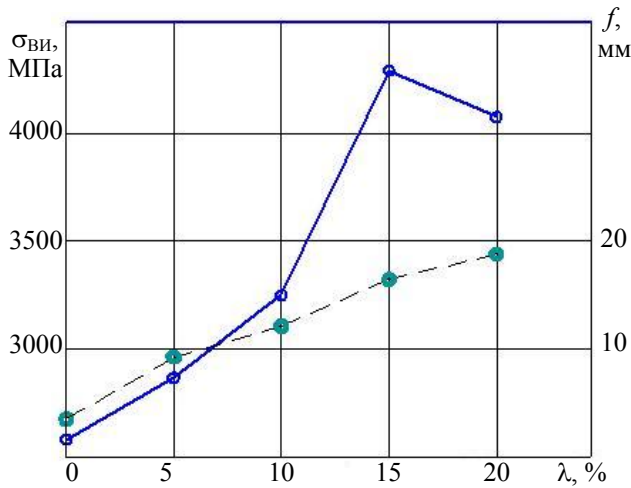


Рис. 2. Влияние степени деформации на свойства стали 9Х. Испытание на изгиб. $T_{\text{деф}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$; упрочнение сквозное $T_{\text{отп}} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$; твердость 65...66 HRC; «—» $\sigma_{\text{ви}}$; «- - - -» f

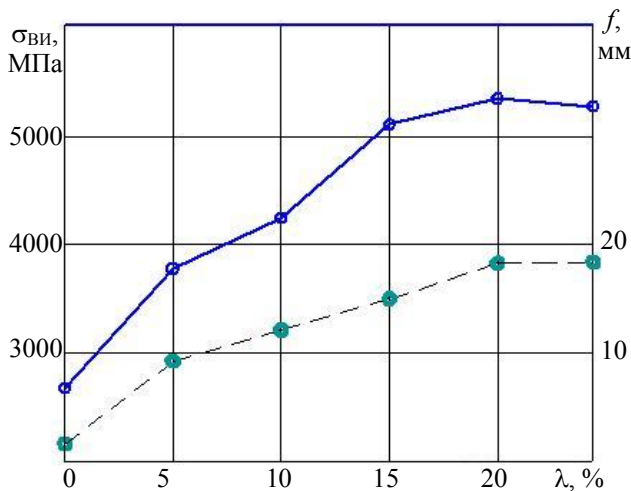


Рис. 3. Влияние степени деформации на свойства стали ШХ15. Испытание на изгиб. $T_{\text{деф}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$; упрочнение сквозное $T_{\text{отп}} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$; твердость 65...66 HRC; «—» $\sigma_{\text{ви}}$; «- - - -» f

Этот факт имеет существенное значение при применении ТДО для упрочнения деталей изделий машиностроения, когда использование больших деформаций, рекомендуемых, например при термомеханической обработке проката, нереализуемо.

Одним из видов таких деталей являются крупногабаритные цилиндрические винтовые пружины, изготавливаемые горячей навивкой [5], например пружины подвески грузовых железнодорожных вагонов. Такая пружина – удобный объект для моделирования процессов структурообразования при термомеханических воздействиях: навивка пружины производится при высоких температурах, позволяющих осуществлять закалку с навивочного

нагрева, геометрические параметры (соотношение диаметров прутка и пружины) обеспечивают в наружных слоях металла витка пружины степени деформации 10...20 %, достаточные для получения термомеханического эффекта.

Технология реализации ТДО при изготовлении крупногабаритных пружин включает в себя [5] ряд операций, определяющих их качество: дефектоскопия исходной заготовки – прутка; индукционный объемный нагрев прутка; навивка пружины на оправку; повитковая закалка навиваемой пружины с предварительной посленавивочной выдержкой.

Посленавивочная выдержка необходима для формирования тонкой внутризеренной структуры в стали после деформации при высокой температуре.

Электронномикроскопические исследования показали возможность формирования тонкой полигональной субструктуры в исследованных сталях при ТДО (рис. 4, 5).

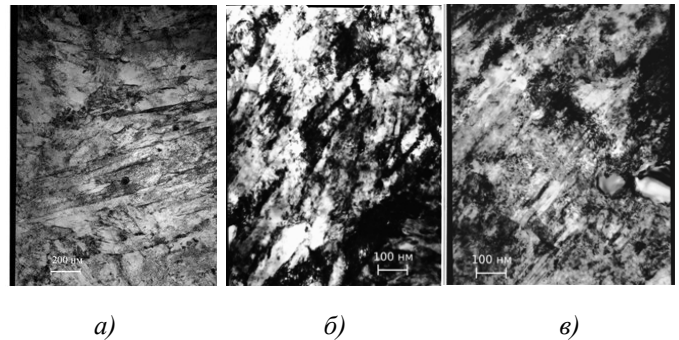


Рис. 4. Тонкая структура:

a – проволока из стали 51ХФА, $T_{\text{деф}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 20 \text{ } \%$; *б* – калиброванная сталь 60С2А, $T_{\text{деф}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 10 \text{ } \%$; *в* – калиброванная сталь 9Х $T_{\text{деф}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 20 \text{ } \%$

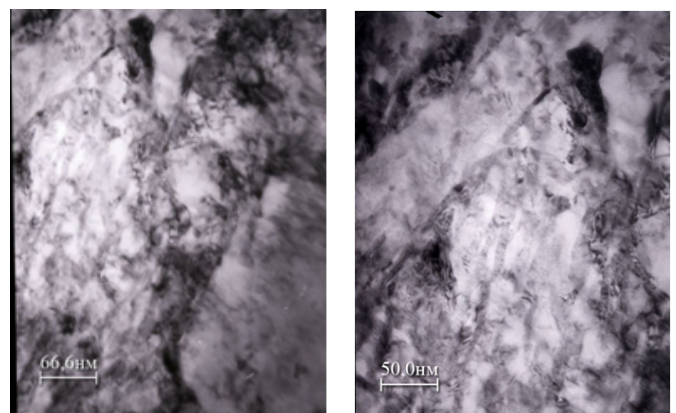


Рис. 5. Тонкая структура материала винтовых пружин (сталь 60С2А, температура нагрева прутка $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, деформация при навивке 20 %, температура отпуска $460 \text{ }^\circ\text{C}$)

Требование о соответствии «нано» – менее 100 нм хотя бы в одном направлении измерения обеспечивается. Так средний размер субструктурных элементов ферритной матрицы в материале поверхностной зоны витка винтовой пружины составляет 20...40 нм при разбросе до 100 нм.

Размер карбидов находится в пределах 7...10 нм. При полной гомогенизации высокотемпературной фазы (при недостаточной температуре индукционного нагрева) в структуре могут быть нерастворившиеся карбиды размерами до 200 нм.

О влиянии субструктуры материала пружины на эксплуатационные характеристики можно судить по результатам исследования осадки пружин во время операции технологического сжатия, релаксационной стойкости при циклических нагрузках, долговечности при испытании на усталость и величине разрушающих напряжений при этом.

О повышенном сопротивлении материала пружин с наноразмерной субструктурой микроскопическим деформациям говорят и результаты изменения свободной высоты (осадки) при циклических испытаниях (рис.6).

Из графиков видно, что величина осадки пружин с наноразмерной структурой в десять раз меньше чем у пружин, изготовленных по обычной технологии.

Нагружение при испытании по пульсирующему циклу. В подрисовочном тексте указана степень деформации наружных волокон – это удлинение наружного волокна при навивке пружины. Она зависит от показателя

$$C = \frac{D}{d}$$

На рис. 7, а, б представлены результаты испытания винтовых пружин из стали 60С2ХФА. Характеристики пружин: диаметр прутка 19 мм; наружный диаметр 134 мм; шаг 40 мм; рабочее усилие 9,59 кН; длина в свободном состоянии 259 мм.

Нагружение пружин проводилось по асимметричному знакопостоянному циклу. Величина статической деформации пружины – 68 мм. Рабочая переменная составляющая деформации ± 21 мм.

В качестве сравнения, характеризующего уровень долговечности пружин, можно взять напряжение 190 мПа; у обычных пружин (кривая усталости рис.7, а) число циклов до разрушения ≈ 230 000, у пружин с наноразмерной структурой 10⁷ – без разрушения.

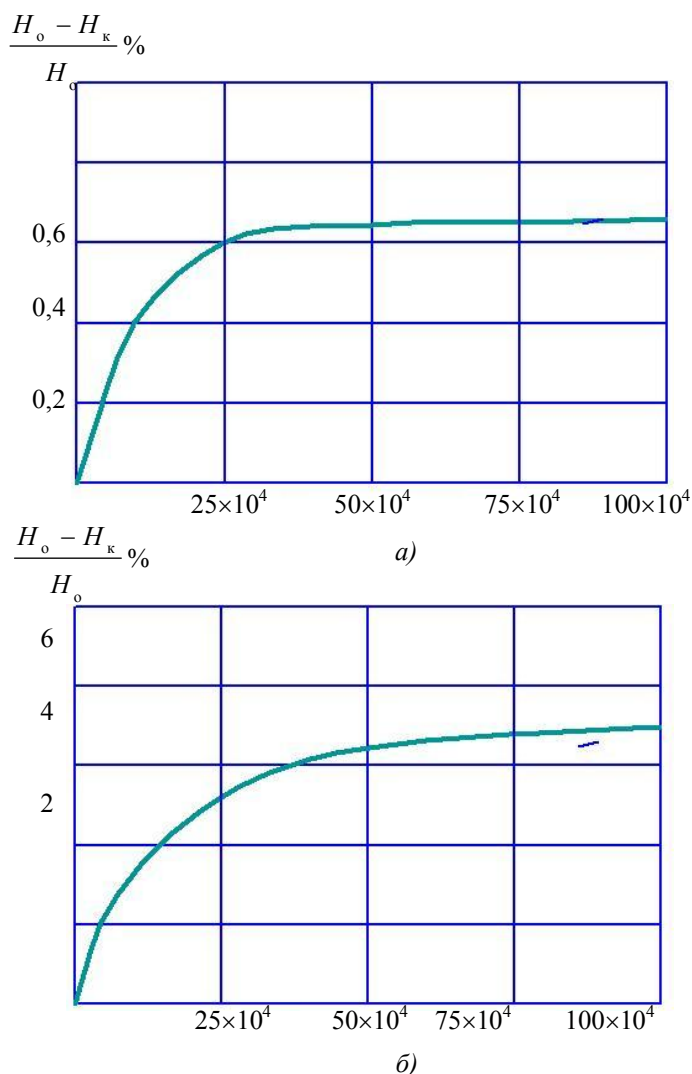


Рис. 6. Изменение свободной высоты пружины H_0 (осадка) при циклическом нагружении:

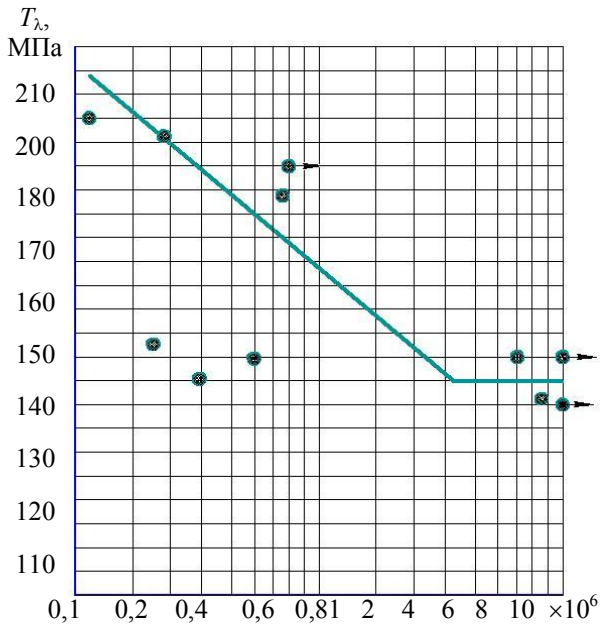
а – пружины с ТДО, $T_n = 1020$ °С, $T_{отп} = 460$ °С, степень деформации наружных волокон 15 %; б – пружины с обычной термообработкой $T_{зак} = 860$ °С, $T_{отп} = 460$ °С. Сталь 60С2А; напряжение испытания 900 МПа

Сравнение полученных кривых показывает насколько отличается величина разрушающих напряжений при одинаковых условиях испытания у пружин, произведенных по технологии обычной горячей навивки и технологии формирования наноразмерной субструктуры.

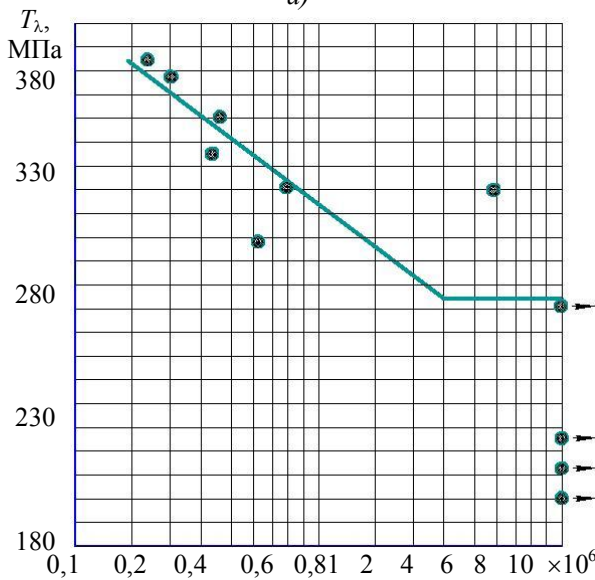
О влиянии субструктуры, имеющей наноразмеры, полученной при ТДО проволоки, свидетельствуют и результаты усталостных испытаний винтовых пружин навитых из неё (рис.8). Также, как и у пружин горячей навивки установлено значительное увеличение ограниченной долговечности при напряжениях, превышающих предел усталости.

ТДО может применяться в качестве упрочняющей операции при изготовлении различ-

ных цилиндрических деталей, испытывающих в эксплуатации контактные циклические нагрузки-валки станов холодной прокатки, бандажи колес транспортных средств, катки гусеничной техники и т.д.



а)



б)

Рис. 7. Результаты испытания на усталость внутренних пружин:

а – технология горячей навивки; б – ТДО

Исследования контактно-усталостной прочности проводилось на опытных образцах валков станов холодной прокатки.

Заготовки валков с припуском на обжатие нагревались токами высокой частоты, деформировались обкаткой на специальном оборудовании до требуемого размера. Изменение параметров оборудования (частота тока, скорость продольного перемещения заготовки

через деформирующее устройство) позволило получать упрочненный слой различной глубины, включая и упрочнение всего поперечного сечения.

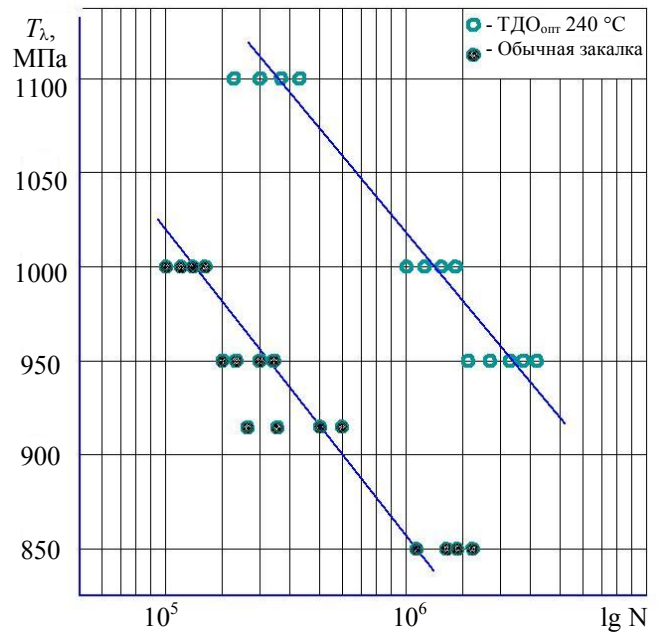


Рис. 8. Кривые усталости винтовых цилиндрических пружин (проволока из стали 51ХФА)

Из валка, прошедшего ТДО, вырезались образцы в виде ролика, которые испытывались на специальном стенде. Схема нагружения приведена на рис. 9.

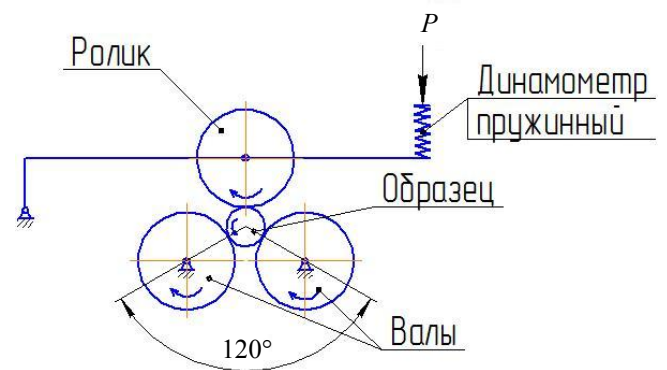


Рис. 9. Схема нагружения образца при испытании на контактную усталость

Результаты испытаний приведены на рис. 10.

Из него следует, что обычно применяемые способы упрочнения – объемная закалка с печного нагрева и поверхностная закалка токами высокой частоты – обеспечивают практически одинаковую и прочность (предел контактной усталости) и долговечность, при циклических контактных нагрузках.

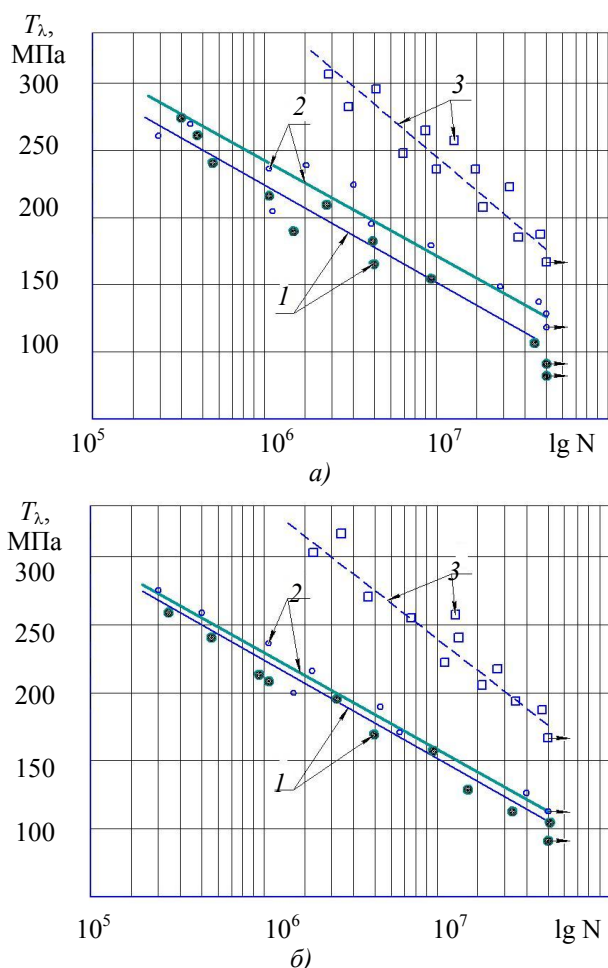


Рис. 10. Результаты испытаний на контактную усталость образцов стали 9Х (а) и ШХ15 (б)

После ТДО, в результате которой в металле поверхностного слоя валка формируется субструктура, имеющая размеры менее 100 нм (см. рис. 4), усталостная прочность при контактном нагружении существенно увеличивается, предел контактной усталости на базе $5 \cdot 10^7$ циклов увеличивается с 1150 МПа до 1700 МПа у образцов из стали 9Х и с 1200 МПа до 1800 МПа у стали ШХ15, а ограниченная долговечность при $\sigma_k = 2000$ МПа у образцов из стали 9Х увеличивается в 11,2 раза (с $2,5 \cdot 10^6$ циклов до $3,1 \cdot 10^7$ циклов).

Выводы

1. В конструкционных сталях и деталях машин наноразмерная структура формируется при термодиформационной обработке, включающей индукционный нагрев, относительно небольшие деформации и регламентированное охлаждение.

2. Термодиформационная обработка может применяться при изготовлении цилиндрических винтовых пружин холодной и горячей навивки, а также цилиндрических деталей, испытывающих в эксплуатации циклические нагрузки.

3. Ограниченная долговечность пружин горячей и холодной навивки при циклическом сжатии увеличивается не менее чем в 10 раз. Также увеличивается ограниченная долговечность образцов валков станов холодной прокатки из стали 9Х и ШХ15 при контактной усталости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лякишев, Н.П., Алымов, М.И. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. – 2006. Т. 1. – № 1-2. – С. 71.
2. Valiev R.Z., Alexandrov J.V., Zhu Y.T., Towe T.C. Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation // J. Mater. Res. 2002. V. 17. P. 5.
3. Valiev R.Z. Nanomaterial advantage // Nature. 2002. V. 419. P. 887-889.
4. Шаврин, О.И. Формирование наноразмерной структуры в материале деталей машин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. Вып. 1. – С. 4–6.
5. Шаврин, О.И. Высокопрочные пружины для подвижного состава железных дорог // Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог. – 2012. Вып. 3. – С. 71–80.
6. Shavrin O.I. Influence Of Nanotechnology On Coiled Springs Operational Characteristics // Nanostructures, Nanomaterials and Nanotechnologies to Nanoindustry. 2014. P. 260–272.
7. Shavrin O.I., Scvortsov A.N., Maslov L.M. Manufacturing schemes of nanoscalestructure formation in machin parts // Machines, Technologies, Materials. 2015. Iss. 6. P. 34–37.
8. Шаврин, О.И., Маслов, Л.Н., Лукин, Л.Л. Влияние термодиформационной обработки на субструктуру и прочностные характеристики пружинных сталей // Российские нанотехнологии. – 2016. V. II. – №3–4.
9. Роль дислокаций и упрочнения в разрушении металлов/ под ред. В.С. Ивановой. – М.: Наука, – 1965. – 180 с.
10. Бернштейн, М.Л., Займовский, В.А., Капуткина, Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, – 1983. – 480 с.

REFERENCES

1. Lyakishev, N.P., Alymov, M.I. Nano-materials of structural purpose // Russian Nanotechnologies. – 2006. Vol. 1. – № 1-2. – pp. 71.
2. Valiev R.Z., Alexandrov J.V., Zhu Y.T., Towe T.C. Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation // J. Mater. Res. 2002. V. 17. P. 5.
3. Valiev R.Z. Nanomaterial advantage // Nature. 2002. V. 419. P. 887-889.
4. Shavrin, O.I. Formation of nano-dimension structure in material of machinery // Bulletin of Izhevsk Technical University. – 2011. Issue 1. – pp. 4–6.
5. Shavrin, O.I. High-strength springs for rolling-stock // Bulletin of Natural Monopoly Institute: Railway Equipment. – 2012. Issue 3. – pp. 71–80.
6. Shavrin O.I. Influence Of Nanotechnology On Coiled Springs Operational Characteristics // Nanostructures, Nanomaterials and Nanotechnologies to Nanoindustry. 2014. P. 260–272.
7. Shavrin O.I., Scvortsov A.N., Maslov L.M. Manufacturing schemes of nanoscalestructure formation in machine parts // Machines, Technologies, Materials. 2015. Iss. 6. P. 34–37.
8. Shavrin, O.I., Maslov, L.N., Lukin, L.L. Thermodeformation treatment influence upon substructure and spring steel strength characteristics // Russian Nanotechnologies. – 2016. V. II. – №3–4.
9. Role of Dislocation, Strengthening and Metal Destruction/ under the editorship of V.S. Ivanova. – M.: Science, – 1965. – pp. 180.
10. Bernstein, M.L., Zaimovsky, V.A., Kaputkina, L.M. Steel Thermomechanical Treatment. – M.: Metallurgy, – 1983. – pp. 480.

Рецензент д.т.н. В.А. Дёмин