

296К), наблюдается аномально высокая неупругая деформация, превышающая на 4,5% КРНД данного сплава. Неупругая деформация понижается при повышении температуры нагружения до T_R , а при температурах выше T_R на 15-30 градусов становится равной или меньше КРНД.

Список литературы

1. K. Otsuka, X. Ren. Physical metallurgy of Ti-Ni- based shape memory alloys.// Progress in Materials Science, 2005, V. 50, P. 511-678
2. С.Д. Прокошкин, А.В. Коротыцкий, В. Браиловский, К.Э. Инаекян, С.М. Дубинский. Кристаллическая решетка мартенсита и ресурс обратимой деформации термически и термомеханически обработанных сплавов Ti-Ni с памятью формы.// ФММ, 2011, Т. 112, №2. С.180-198.
3. Е.П. Рылкина, С.Д. Прокошкин, А.Ю. Крейцберг. Возможности достижения предельно высоких эффектов памяти формы в сплаве Ti- 50,0 ат.% Ni в различных структурных состояниях аустенита.// Известия РАН, Сер. физическая, 2013, Т. 77, №11. С.1644-1652.

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 09Г2С

А.С. СМЕРНОВА^{1,2}, Ю.И. ПОЧИВАЛОВ¹, В.Е. ПАНИН^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: nasO@mail2000.ru

INFLUENCE OF SURFACE LAYERS ON NANOSTRUCTURING FATIGUE PROPERTIES OF 09G2C STRUCTURAL STEEL

A.S. SMIRNOVA^{1,2}, YU.I. POCHIVALOV¹, V.E. PANIN^{1,2}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

²National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: nasO@mail2000.ru

Annotation. This paper presents the results of the effect of different combinations of heat treatment and nanostructuring of the surface layers on the fatigue life of 09G2S steel. One of the most important scientific and technical problems of our time is the problem of extending the life of the safe operation of potentially dangerous high-risk facilities, without accidents and pollution. These systems include the main gas pipelines of the increased risk of them technological accidents caused by lack of operational reliability of the metal. Conducted fatigue tests have shown the effectiveness of the use of ultrasonic mechanical forging surface layers of 09G2S steel. Fatigue strength of 09G2S steel with nanostructured surface layer is greater than 80,000 cycles, which is 3.4 times the fatigue life of the quenched samples without nanostructured surface layer, while maintaining the high thermal stability of the nanostructure. Therefore, the formation of the nanostructured surface layer of the structural steel increase cracks initiation voltage.

Введение

Научно-техническая проблема увеличения эксплуатационных ресурсов высоконагруженных потенциально опасных объектов, таких как магистральные газо- и нефтепроводы, мосты, элементы конструкций, применяемые в авиационной, космической сфере и кораблестроении и т.д., является одной из важнейших на сегодняш-

ний день. Для решения этой проблемы разрабатываются новые высокопрочные стали и высокоэффективные методы их термомеханической обработки. В настоящей работе предложен новый способ термомеханической обработки малоуглеродистых низколегированных сталей с использованием ультразвуковой механическойковки. Использование последней позволило получить в поверхностном слое стали наноструктуру с высокими механическими свойствами. При такой термомеханической обработке были достигнуты очень высокие значения прочности стали в сочетании с хорошей пластичностью и высокие значений усталостной прочности и долговечности исследуемого материала.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования была выбрана малоуглеродистая низколегированная сталь 09Г2С. Содержание основных легирующих элементов стали 09Г2С приведено в таблице 1. Сталь 09Г2С исследовали в трех структурных состояниях: после нормализации при 1203 К (10 минут) и двух термомеханических обработок (ТМО1 и ТМО2). Металлографические исследования выполнены на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axiavert 25 CA, рентгеноструктурный анализ на автоматическом дифрактометре ДРОН 3М в CuK_α -излучении. Механические испытания на активное растяжение проводили на универсальной испытательной машине «Instron-5582», испытания на малоцикловую усталость выполнены на гидравлической испытательной машине «Schcnck Sinus.100.40. ».

Таблица 1 - Химический состав стали 09Г2С

Содержание химических элементов, %								
C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Fe
0,10	0,59	1,38	0,08	0,12	0,017	0,01	-	ост.

Для механических испытаний использовали образцы в виде двусторонней лопатки с размерами рабочей части 3,8x1,3x20 мм. Ультразвуковую механическую обработку проводили на установке ИЛ4-10 мощностью 630 Вт на частоте 22 кГц.

Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктура стали в нормализованном состоянии представляет собой двухфазную феррито-перлитную структуру с параметром решетки 0,2868 нм и размером зерна 8-30 мкм, рисунок 1 а, таблица 2.

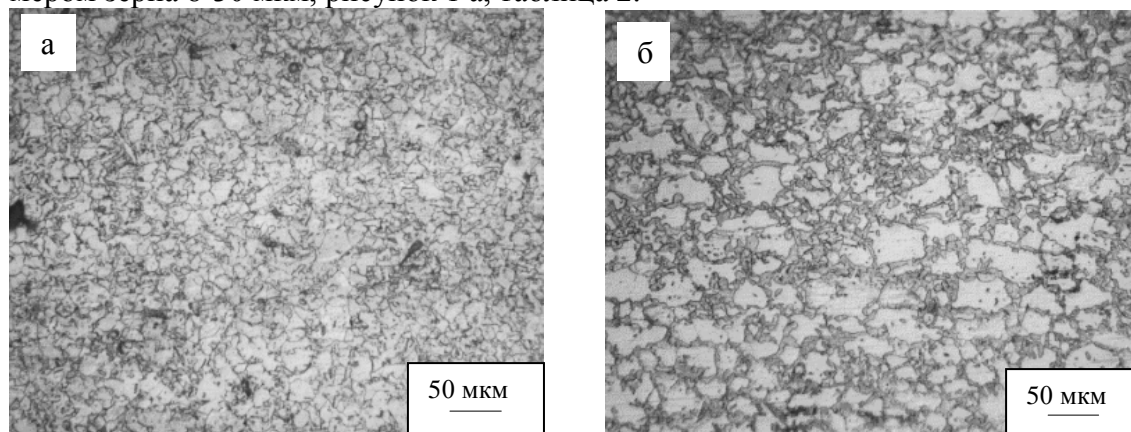


Рисунок 1 - Структура стали 09Г2С: а - нормализация при 1203К; б – после ТМО2

После термомеханической обработки формируется феррито-мартенситная структура с образованием новых зерен феррита по границам старых зерен. Средний размер зерна в такой структуре 20-50 мкм. Параметр решетки исследуемой стали после ТМО1 уменьшается по сравнению с нормализованным состоянием, а после ТМО2 увеличивается. Величина области когерентного рассеяния после ТМО1 наоборот увеличивается по сравнению с нормализованным состоянием, а после ТМО2 уменьшается, таблица 2.

Таблица 2 - Данные рентгеноструктурного анализа

	Нормализация	ТМО1	ТМО2
а α-Fe, нм	0,2868±0,0001992	0,28669±0,00008044	0,28691±0,0002036
Величина ОКР, нм	26,3708	28,7864	25,7205

Диаграммы нагружения образцов стали 09Г2С, подвергнутой нормализации и последующей ультразвуковой обработке позволили оценить влияние наноструктурированного поверхностного слоя на характер развития деформации в данной стали, рисунок 2, таблица 3.

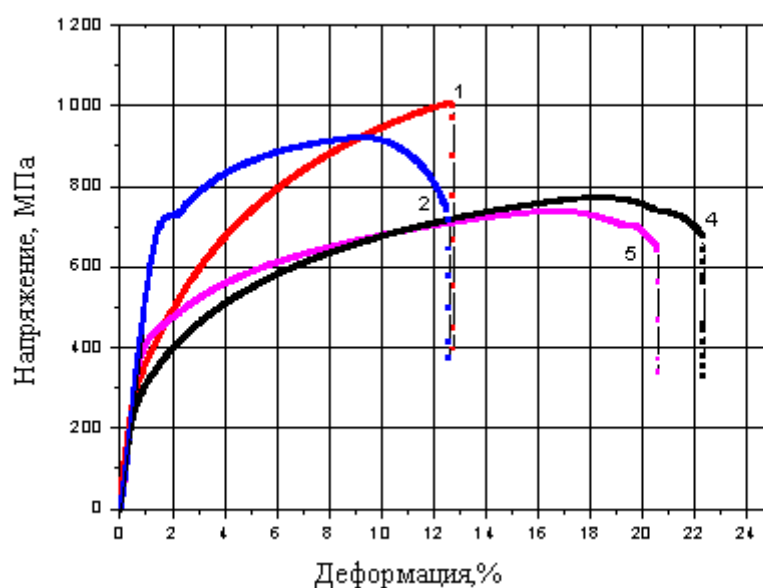


Рисунок 2 - Диаграмма растяжения образцов стали 09Г2С: 1- ТМО1; 2- ТМО2; 3- нормализации 1203 К; 4- нормализации + УФО

Из экспериментальных данных следует, что формирование наноструктурированного поверхностного слоя приводит к значительному увеличению предела упругости и текучести при небольшом снижении прочности и пластичности. Соответственно это обеспечивает высокое соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, которое определяет ресурс работы конструкционных материалов в процессе эксплуатации. После термомеханических обработок прочностные свойства стали 09Г2С резко возрастают с 736 МПа до 1003,82 МПа при снижении пластичности почти в 2 раза, таблица 3. При этом наибольшее соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ достигается после термомеханической обра-

ботки по режиму 2 (ТМО2), поэтому этот режим обработки должен быть наиболее эффективен для повышения усталостных характеристик исследуемой стали.

Таблица 3 - Механические свойства образцов стали 09Г2С

Структурное состояние стали 09Г2С	Предел упругости, σ_0 , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности, σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	Относительное удлинение, %
нормализация	207,51	257	770	0,33	22,37
нормализация + УФО	335,08	385	736	0,52	20,61
ТМО1	294,15	391,1	1003,82	0,39	12,78
ТМО2	528,5	610,08	919,48	0,53	12,6

Проведенные усталостные испытания подтвердили это предположение, таблица 4. После ТМО2 при приложенном напряжении 600 МПа усталостная долговечность стали 09Г2С возрастает в 3,4 раза относительно ТМО1. Сравнение полученных в работе данных по усталостным испытаниям для исследуемой стали, с имеющимися в литературе для нормализованного состояния, показывает, что предлагаемые режимы термомеханической обработки позволяют повысить ее усталостную прочность с 250-300 МПа до 600 МПа.

Таблица 4 - Повышение усталостной долговечности конструкционной стали 09Г2С при наноструктурировании поверхностных слоев

Материал, Напряжение, МПа	Число циклов до разрушения		Коэффициент увеличения ресурса
	ТМО1	ТМО2	
09Г2С, 600 МПа	8557 - 24859	32334 - 82099	3,4

Заключение

Предложена новая термомеханическая обработка малолегированной стали 09Г2С обеспечивающая повышения прочностных и усталостных характеристик по сравнению с нормализованным состоянием. Применение новой термомеханической обработки обеспечило повышение ее усталостной прочности до 600 МПа.

Список литературы

1. В.П. Алехин, О.В. Алехин. Физические закономерности деформации поверхностных слоев материалов. - М.: МГИУ. 2011. - 455 с.
2. Б.И. Мордюк. Закономерности структурообразования и кинетика деформационных процессов в металлических материалах при комбинированных воздействиях с использованием ультразвука: автореф. доктора физ.-мат. наук.– Киев, 2012. – 38 с.
3. А.С. Острижная, Ю.И. Почивалов, В.Е. Панин. Влияние наноструктурирования поверхностных слоев на усталостную долговечность конструкционных титановых сплавов и их сварных соединений // V Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Суздаль. 6-10 октября 2014 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2014 - С. 438-440.

4. В.Е. Панин, В.П. Сергеев, А.В. Панин. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий. - Томск: Изд-во ТПУ, 2010. - 286 с.
5. В.Е. Панин, В.П. Сергеев, А.В. Панин, Ю.И. Почивалов. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий - эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов // ФММ. - 2007. - Т.104. - № 6. - С. 1-11.
6. A.V. Panin, V.A. Klimenov, Yu.I. Pochivalov, A.A. Son, M.S. Kazachenok. The effect of ultrasonic treatment on mechanical behavior of titanium and steel specimens. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 41, 1-3 (2004), p. 163-172.

**ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА Fe-Ni-Co-Al-Nb**

М.Ю. ПАНЧЕНКО, О.А. КУЦ

Национальный исследовательский Томский государственный университет
E-mail: panchenko.marina4@gmail.com

**THE EFFECT OF AGING ON MECHANICAL AND FUNCTIONAL
PROPERTIES OF SINGLE CRYSTALS OF Fe-Ni-Co-Al-Nb ALLOYS**

M.Y. PANCHENKO, O.A. KUTS

National Research Tomsk State University
E-mail: panchenko.marina4@gmail.com

Annotation. The effect of aging time at 973 K on the stress-induced thermoelastic γ - α' -martensitic transformation and superelasticity in tension in single crystals of ferromagnetic Fe-28 % Ni-17 % Co-11.5 % Al-2.5 % Nb (at.%) alloy was investigated. It was established that maximum value of superelasticity at γ - α' -martensitic transformation up to 8.5% were reached in one-hour aged crystals. The increase in time of aging up to 5-7 hours leads to the reduction of value of superelasticity to 6% and value of stress hysteresis more than by 3 times.

В последнее время идет интенсивная разработка новых высокопрочных сплавов на основе железа с эффектами памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности (СЭ) для использования их в качестве сенсоров, датчиков и актюаторов. Известно, что для того чтобы γ - α' (γ – гранецентрированная кубическая решетка, α' – объемноцентрированная тетрагональная решетка) мартенситные превращения (МП) в сплавах на основе железа Fe-Ni-Co-Al-X (X=Ti,Ta) были термоупругими необходимо выделение дисперсных частиц упорядоченной γ' -фазы [1]. Частицы γ' -фазы повышают уровень прочностных свойств высокотемпературной фазы, уменьшают величину термического гистерезиса $\Delta T=A_f-M_s$ в 10-15 раз (M_s – температура начала прямого МП при охлаждении, A_f - температура конца обратного МП при нагреве) и приводят к смене нетермоупругого γ - α' МП к термоупругому с ЭПФ и СЭ, величина которых в данных сплавах составляет 2-13 % [1]. Следовательно, они представляют интерес с точки зрения их практического применения, и поиск оптимальных термических обработок в сплавах на основе железа для реализации больших обратимых деформаций остается актуальным.