

## **Влияние прессования пучка волокон стали 12X18H10T на их структуру и свойства**

В. А. Зорин, Ю. Ф. Луговской, В. А. Назаренко,  
С. А. Спиридонов

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН  
Украины, Киев, e-mail: lugovski\_u@ukr.net

*Исследованы структура и механические свойства при статическом и циклическом нагружении отдельных волокон стали 12X18H10T диаметром 0,08 мм в составе пучков однонаправленных волокон, обжатых одноосным давлением 196—1427 МПа. Установлено, что это приводит к появлению новой фазы, обладающей магнитными свойствами, объемное содержание которой возрастает по мере увеличения давления прессования. При этом повышаются пределы прочности и выносливости волокон, но снижается их пластичность и декремент колебаний.*

**Ключевые слова:** волокна, структура, прочность, усталость, декремент.

В последнее время проводятся исследования особого класса конструкционных материалов. Это однокомпонентные материалы с однонаправленной волокнистой структурой и содержанием несущих элементов — волокон практически 100% [1—3]. Их получают прессованием пучков волокон. При этом свойства волокон в пучке могут изменяться.

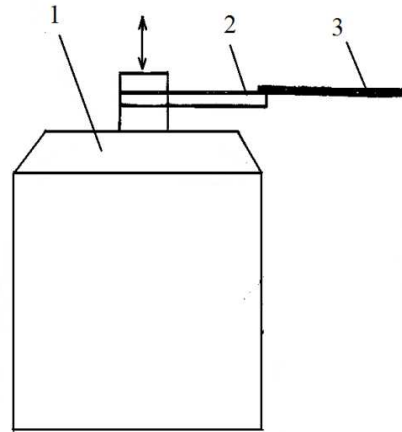
Цель работы — изучить влияние напряжения обжатия пучка волокон из нержавеющей стали 12X18H10T на структуру, прочностные и демпфирующие свойства отдельных волокон. Последующие исследования механических свойств всего пучка позволят оценить влияние связи между волокнами на свойства материала.

### **Материалы и методы исследования**

Образцы материалов получали односторонним прессованием пучков волокон при комнатной температуре на гидравлическом прессе в пресс-форме. Пуансон имел поверхность в виде прямоугольника с размерами 55x5 мм, по которой к пучкам прикладывалось уплотняющее усилие. Пучок волокон состоял из нескольких сотен отдельных ровных проволок длиной 55 мм и диаметром 0,08 мм из стали 12X18H10T. Масса пучка волокон равна массе беспористого образца из этой же стали. Уплотнение пучков волокон осуществляли при усилиях 196, 535, 1070 и 1427 МПа. После прессования пучка волокон до толщины 2 мм отдельные волокна извлекали из середины образца. Эти волокна не претерпели воздействия сил трения о поверхность пресс-формы.

Структуру волокон вдоль и поперек продольной оси в исходном состоянии и после обжатия давлением 1427 МПа изучали после травления шлифов волокон на растровом электронном микроскопе Superprob-733, JEOL. Механические свойства волокон определяли при статическом растяжении на машине РМ-3-1 по ГОСТ 6611.3-69. Усталостные свойства

Рис. 1. Схема установки для усталостных испытаний материалов на изгиб: 1 — виброэлектродинамический стенд (ВЭДС); 2 — промежуточная пластина; 3 — образец постоянного поперечного сечения.



волокон в виде образцов постоянного поперечного сечения исследовали до и после прессования по методике [4] на установке ВЭДС-200 (рис. 1). Частота резонансных колебаний образца  $f$  составляла 2,4 кГц.

Максимальное напряжение в опасном сечении образца рассчитывали по измерениям амплитуды колебаний образца в двух точках — на его конце  $W_0$  и в зажиме промежуточной пластины  $W_1$ :

$$\sigma_a = 2\pi f W_0 (E\rho)^{1/2} [U(\alpha x) + P V(\alpha x)], \quad (1)$$

где коэффициент  $P$  и аргумент  $\alpha x$  функций А. Н. Крылова определяли из выражения

$$P = [-S(\alpha x) - W_0/W_1]/T(\alpha x). \quad (2)$$

Анализ величин, входящих в формулу (1) для расчета напряжений, показал, что основной вклад в погрешность расчета напряжений по данной методике вносят измерения амплитуды  $W_0$  (2%), модуля Юнга  $E$  (1%) и плотности  $\rho$  (0,7%) исследуемого материала. Погрешности определения величин  $\alpha$  и  $P$ , входящих в формулу (2), слабо влияют на точность расчетов. Суммарная систематическая погрешность расчета напряжений по формуле (1) составляет 4%.

Декремент колебаний  $\delta$  исследованных материалов определяли по методике, описанной в работе [5], на установке ВЭДС-200 по ширине резонансной кривой на частоте около 240—440 Гц и по первой форме собственных изгибных колебаний консольно закрепленных образцов в зависимости от максимальных циклических деформаций  $\varepsilon$ . Величину декремента колебаний рассчитывали по формуле

$$\delta = \pi K_{0,5} \Delta f/f, \quad (3)$$

где  $K_{0,5} = 1/(3)^{1/2}$  для уровня 0,5 максимальной амплитуды на данном уровне возбуждения;  $\Delta f$  — ширина резонансного пика на уровне 0,5 $W$ ;  $W$  — амплитуда резонансных колебаний свободного конца образца;  $f$  — резонансная частота на минимальном уровне возбуждения колебаний. Величину  $\varepsilon$  рассчитывали по формуле  $\varepsilon = \sigma_a/E$ .

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Структура исследованных волокон в исходном состоянии после волочения представлена равноосными зёрнами различного размера на рис. 2, *a—в*. Средний диаметр зёрен (темные пятна на рис. 2, *б*), расположенных на расстоянии 2—5 мкм от поверхности образца, составляет менее 1 мкм. Ближе к центру волокна их диаметр увеличивается до 6 мкм (рис. 2, *a*). Кроме этого, на краю волокна, где поверхность

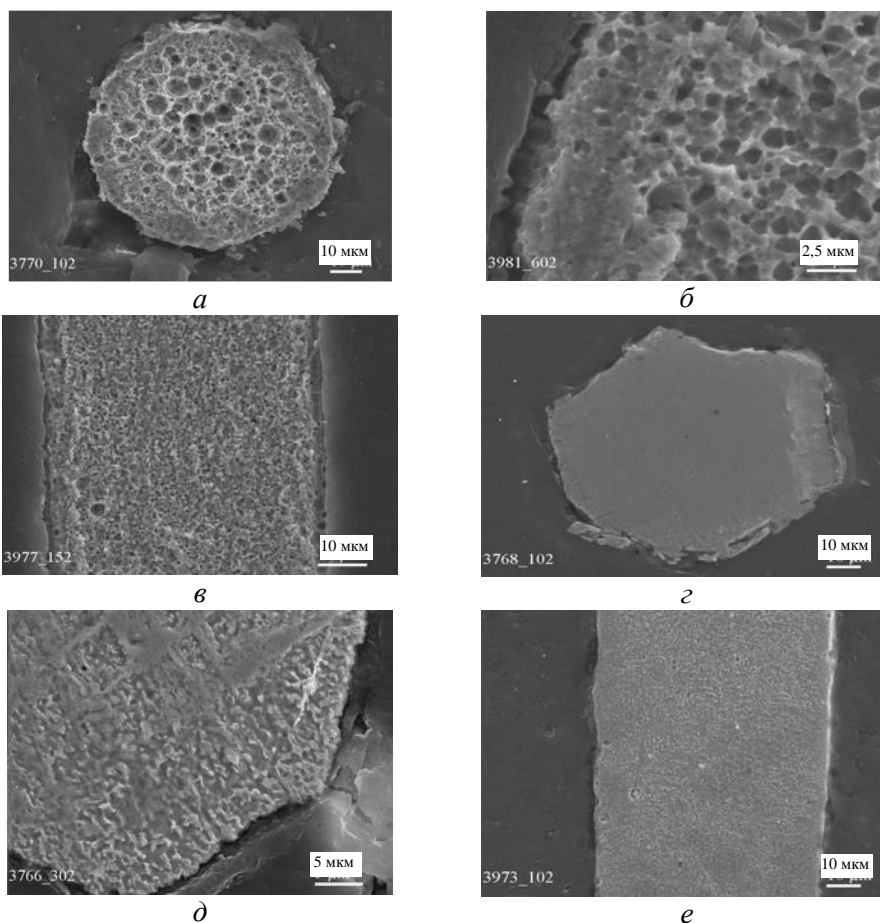


Рис. 2. Структура исследованных волокон нержавеющей стали X18Ni10Ti после травления шлифа до (а—в) и после прессования давлением 1427 МПа (г—е): а, г — общий вид торца; б, д — увеличенный край; в, е — вдоль волокна.

сравнительно гладкая и без темных пятен, материал протравлен слабее, чем ближе к середине (рис. 2, а, б). Толщина этой зоны примерно 5 мкм, что составляет 6% площади сечения и объема материала. На шлифе вдоль волокна (рис. 2, в) зерна представлены также равноосными пятнами, расположенными в виде цепочек. В процессе уплотнения пучка волокон проволоки прижимаются друг к другу и форма их сечения изменяется с круглой на шестигранную (рис. 2, г, д). При этом размеры зерен проволоки после обжатия усилием 1427 МПа изменяются незначительно. Это соответствует данным работы [6] (с. 43), где отмечается, что "после волочения удлинённые зерна остаются более или менее равноосными.... Холодная деформация в аустенитных сталях действует в основном на аустенит, при этом возможно возникновение новых фаз, которые изменяют механические свойства металла".

Подтверждением этому является изменение магнитных свойств исследованных волокон после прессования. В частности, обнаружено, что после обжатия пучка волокон давлением 535 МПа и выше немагнитные исходные волокна аустенитной нержавеющей стали становятся все более чувствительными к воздействию магнитного поля постоянной величины.

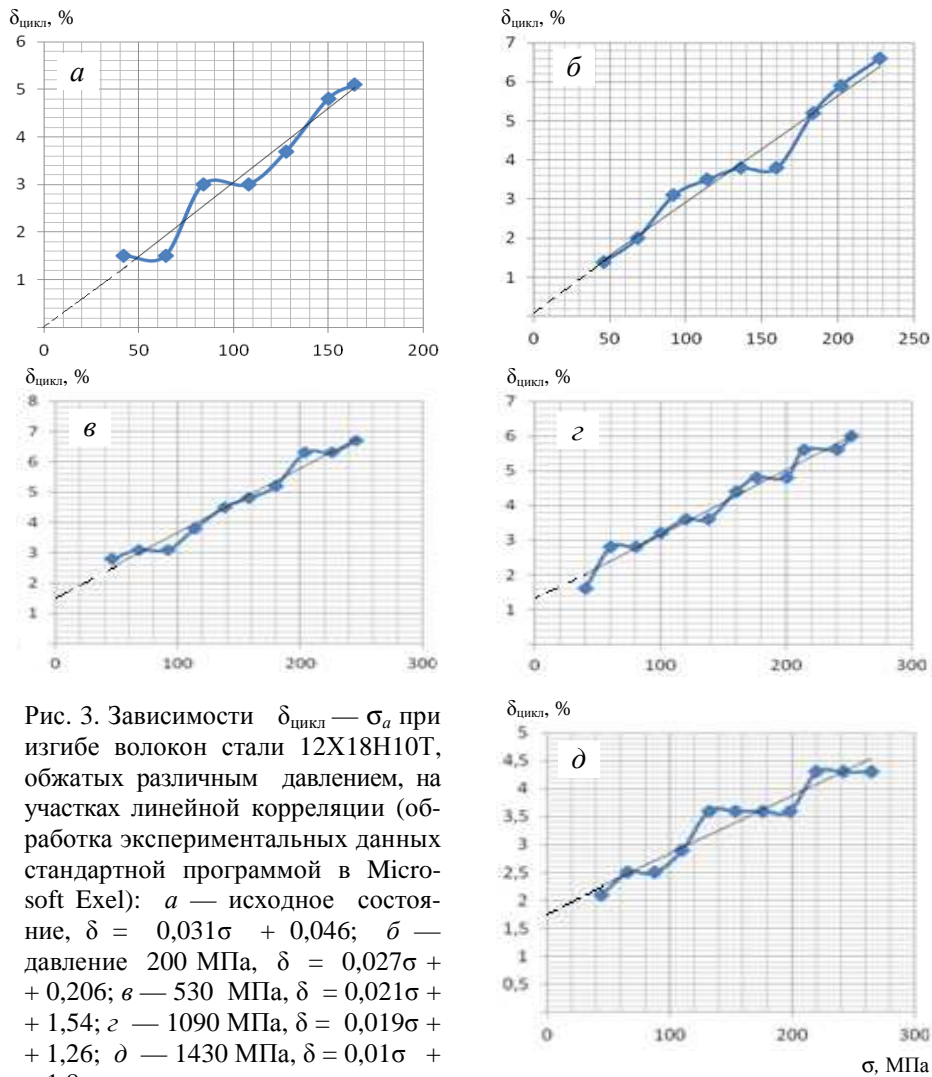


Рис. 3. Зависимости  $\delta_{\text{цикл}} — \sigma_a$  при изгибе волокон стали 12X18N10T, обжатых различным давлением, на участках линейной корреляции (обработка экспериментальных данных стандартной программой в Microsoft Excel): *a* — исходное состояние,  $\delta = 0,031\sigma + 0,046$ ; *б* — давление 200 МПа,  $\delta = 0,027\sigma + 0,206$ ; *в* — 530 МПа,  $\delta = 0,021\sigma + 1,54$ ; *г* — 1090 МПа,  $\delta = 0,019\sigma + 1,26$ ; *д* — 1430 МПа,  $\delta = 0,01\sigma + 1,8$ .

**Т а б л и ц а 1.** Механические свойства при статическом и циклическом нагружениях отдельных волокон стали 12X18N10T после их одноосного прессования в пучке различным давлением

Давление прессования, МПа	$\sigma_B$ , МПа	$S_\sigma$ , МПа	$\delta_{\text{общ}}, \%$	$S_\delta$	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\delta_{\text{цикл}}, \%$
0	782	8,7	59	1,2	630	4,9
200	804	19	29	0,3	650	5,0
530	814	54	27	0,08	670	5,0
1090	866	73	10,5	0,03	700	4,2
1430	943	151	9,8	0,05	700	3,45

Зависимости декремента колебаний от напряжений при изгибе волокон стали 12X18N10T, обжатых при различных давлениях, представлены на

рис. 3. Очевидно, что представленные результаты хорошо описываются зависимостью

$$\delta = a\sigma + b, \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные. При этом постоянная  $a$  с увеличением обжатия монотонно уменьшается, определяется как наклон отрезка экспериментальной зависимости и характеризует интенсивность развития неупругих деформаций в образце при возрастании циклической нагрузки. При этом чем сильнее степень статического обжатия волокна, тем менее интенсивно увеличивается неупругая деформация при росте амплитуды циклической нагрузки. Постоянная  $b$  с повышением давления обжатия почти монотонно увеличивается, отсекается на оси ординат продолжением отрезка экспериментальной зависимости и характеризует степень начального декремента колебаний в обжатом волокне при минимальном приложенном циклическом напряжении.

Механические свойства исследованных волокон при статическом и циклическом нагружении представлены в табл. 1 и на рис. 4. Величины предела прочности  $\sigma_B$  при статическом нагружении измеряли на 6 образцах для каждого состояния, что позволило определить дисперсии  $S$  полученных значений  $\sigma_B$  и относительного общего удлинения  $\delta_{\text{общ}}$ . Значения декремента колебаний  $\delta_{\text{цикл}}$  определяли при максимальном напряжении в образце 160 МПа по зависимостям на рис. 3,  $a-d$ .

Исследование волокон при статическом нагружении показало, что повышение предела прочности  $\sigma_B$  на 20% и уменьшение пластичности  $\delta_{\text{общ}}$  после их обжатия на 66% сопровождается ростом дисперсии предела прочности — разбросом экспериментальных значений. Вероятно, по этой причине предел выносливости  $\sigma_{-1}$  волокон возрастает лишь на 11% и выходит

**Т а б л и ц а 2. Механические свойства при статическом и циклическом нагружении стали 12Х18Н10Т [7]**

$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_{\text{общ}}$ , %	$\psi$	$\sigma_{-1}$ , МПа	Обработка поверхности
630	335	57	75	337	Исход. состояние
695	260	63	78	870	АШ и ЭКП

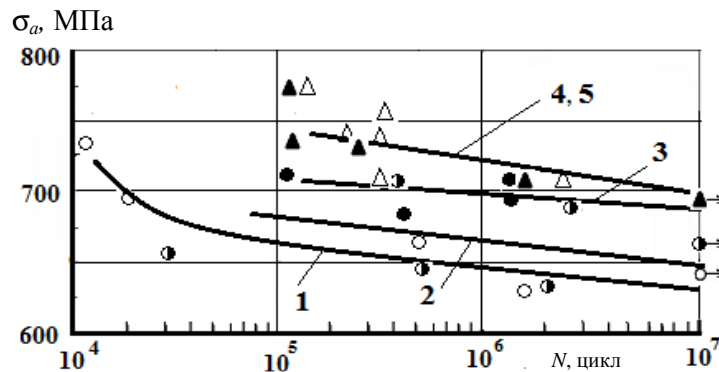


Рис. 4. Кривые усталости для проволоки из нержавеющей стали  $D = 0,08$  мм при изгибе: 1 — исходное состояние; 2 — после обжатия давлением 196 МПа; 3 — 535; 4 — 1070; 5 — 1427 МПа.

на максимальный уровень уже при давлении сжатия 1090 МПа. Полученные результаты коррелируют с известными данными для стали 12X18H10T из справочника [7] (табл. 2), согласно которым алмазное шлифование (АШ) и электрополирование (ЭКП) поверхности образцов узаконной стали существенно повышают её предел выносливости.

Таким образом, обжатие проволоки из нержавеющей стали 12X18H10T диаметром 0,08 мм в составе пучка волокон давлением 196—1427 МПа приводит к появлению новой фазы, обладающей магнитными свойствами, объёмное содержание которой возрастает по мере увеличения давления прессования и повышает пределы прочности и выносливости волокна, но снижает его пластичность и декремент колебаний.

1. Kovar D. Fibrous monolithic ceramics / [D. Kovar, B. H. King, R. W. Trice, J. W. Haloran] // J. Amer. Ceram. Soc. — 1997. — **80**, No. 10. — P. 2471—2487.
2. Ishikawa T. Crack-resistant fiber-bonded ceramic // Adv. Engineering Mater. — 1999. — **1**, No. 1. — P. 59—61.
3. Боровик В. Г. Новый конструкционный материал с однонаправленной волокнистой структурой / В. Г. Боровик, О. Н. Григорьев, В. Н. Субботин // Порошковая металлургия. — 2012. — № 1/2. — С. 65—74.
4. Луговской Ю. Ф. Методика усталостных испытаний композиционных материалов при изгибе, полученных электронно-лучевым испарением // Проблемы спец. электрометаллургии. — 1987. — № 4. — С. 61—65.
5. Писаренко Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. — К. : Наук. думка, 1971. — 375 с.
6. Металлография железа. Т. 3. Кристаллизация и деформация сталей. — М. : Металлургия, 1972. — 236 с.
7. Троценко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: (Справ.). Ч. 2. / В. Т. Троценко, Л. А. Сосновский. — К. : Наук. думка, 1987. — 1302 с.

### **Вплив пресування пучка волокон сталі 12X18H10T на їх структуру та властивості**

В. А. Зорин, Ю. Ф. Луговський, В. А. Назаренко, С. А. Спиридонов

*Досліджено структуру та механічні властивості при статичному і циклічному навантаженнях окремих волокон сталі 12X18H10T діаметром 0,08 мм у складі пучків однонаправлених волокон, пресованих одновісним тиском 196—1427 МПа. Встановлено, що це приводить до появи нової фази, яка має магнітні властивості, об'ємний вміст якої зростає зі збільшенням ступеню тискання. При цьому підвищуються границі міцності та витривалості волокон, але знижується їх пластичність та декремент коливань.*

**Ключові слова:** волокна, структура, міцність, втома, декремент.

### **Influence of 12X18H10T steel fibers beam pressing on their structures and properties**

V. A. Zorin, U. F. Lugovskoi, V. A. Nazarenko, S. A. Spiridonov

*Structure and mechanical properties static at static and cyclic loading of steel fibers 12X18H10T diameter 0,08 mm, composed of bundles from unidirectional fibres compressed pressure from 196 to the 1427 MPA were researched. It was found that this causes the emergence of a new phase (with magnetic properties), volumetric content of which increases as pressure increases the tensile strength and the fatigue limit of fiber, but reduced their plasticity and decrement.*

**Keywords:** fiber, pressure, structure, strength, fatigue, decrement.