

УДК 620.178.32:669.018.44

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА IN718 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Бабенцова Л.П., Анциферова И.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,  
e-mail: lydmila.babencova@yandex.ru*

Развитие новых технологий требует коренного улучшения материалов, способных работать в условиях ударных нагрузок, интенсивного термического воздействия, а иногда и в условиях солнечного облучения и космического излучения. Сплав In718 широко используется в различных отраслях промышленности, таких как авиастроение, автомобилестроение, биомедицина, благодаря своим превосходным механическим свойствам и структурной стабильности в условиях повышенной температуры. При нагреве материалы испытывают высокие напряжения. Испытания проводили в условиях жесткого нагружения при росте температуры. Испытания были проведены до разрушения образцов. Селективное лазерное спекание (SLS) имеет преимущества по сравнению с обычными методами обработки благодаря гибкости конструкции и уменьшению времени выполнения работы. Таким образом, необходимо провести исследования для понимания влияния температуры на механические свойства образцов. В данной работе представлены экспериментальные исследования результатов испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ) образцов из сплава Inconel 718 (In718), полученных методом селективного лазерного спекания на установке Eosint M280. Испытания на МЦУ были проведены на высокотемпературном экстензометре LFMZ-50 с базой 12,5 мм в соответствии с ГОСТ 25.502. Установлено, что сплав IN718 обладает высокими механическими свойствами при статическом и циклическом деформировании, что обеспечивает долговечность и надежность конструкции при различных рабочих температурах.

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость (МЦУ), деформация, напряжение, цикл, сплав Inconel 718, селективное лазерное спекание (СЛС)

## THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE IN718 ALLOY UNDER STATIC AND CYCLIC DEFORMATION

Babentsova L.P., Antsiferova I.V.

*Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: lydmila.babencova@yandex.ru*

The development of new technologies requires a fundamental improvement of materials capable of operating under shock loads, intense thermal effects, and sometimes in the conditions of solar irradiation and cosmic radiation. Alloy In718 is widely used in various industries, such as aircraft, automotive, Biomedicine, due to its excellent mechanical properties and structural stability at elevated temperatures. When heated, materials experience high stresses. The tests were carried out under conditions of hard loading with temperature increase. The tests were carried out before the samples were destroyed. Selective laser sintering (SLS) has advantages over conventional processing methods due to the flexibility of the design and reduced lead time. Thus, it is necessary to conduct research to understand the effect of temperature on the mechanical properties of the samples. This paper presents experimental studies of the results of tests for low-cycle fatigue (MCU) samples of Inconel 718 (In718) alloy obtained by selective laser sintering on the eosint M280. Tests on the MCU were carried out on a high-temperature extensometer LFMZ-50 with a base of 12.5 mm in accordance with GOST 25.502. It is found that in718 alloy has high mechanical properties under static and cyclic deformation, which provides durability and reliability of the structure at different operating temperatures.

**Keywords:** low-cycle fatigue (LCF), deformation, pressure, cycle, Inconel 718 alloy, selective laser sintering (SLS)

Быстрое развитие авиационной и ракетной техники потребовало разработки и усовершенствования не только новых материалов, но усовершенствования существующих методов оценки свойств с целью их приближения к рабочим условиям с улучшенными механическими характеристиками.

Детали и узлы сооружений и машин подвергаются статическим и динамическим нагрузкам. Надежность и долговечность – основные требования, предъявляемые к современным машинам и механизмам. Сплав Инконель 718 разработан в 1963 г. в Хантингтоне (США) и запатентован Special Metals Corporation. Сплав Inconel 718 обладает такими свойствами, как коррозионная устойчивость в диапазоне температур между –250 °С и 650 °С. Этот материал применяется там, где необходимы хорошие рас-

тяжения, ползучесть и прочность. Превосходные характеристики и сопротивление росту трещин делают этот материал идеальным для использования при повышенных температурах. Металлы, которые находятся под постоянной нагрузкой при высоких температурах, обладают склонностью медленно и непрерывно деформироваться. Механическое поведение материалов удобно описывать с помощью деформации, которую создают напряжения, температура, время и циклическая нагрузка. С быстрым развитием современной индустрии необходимо получать изделия с более высокой точностью размера и повышенными механическими свойствами. Таким образом, необходимо применить нетрадиционные технологии для изготовления деталей Inconel 718 с.

**Таблица 1**  
Химический состав материала

Марка сплава	Массовая доля легирующих элементов, %														
	Никель	Хром	Ниобий	Молибден	Титан	Алюминий	Кобальт	Медь	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера	Бор	Железо
NickelAlloy IN718	50-55	17-21	4,75-5,5	2,8-3,3	0,65-1,15	0,2-0,8	≤ 1	≤ 0,3	≤ 0,08	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,006	Остальное

Примечание. Размеры частиц порошка от 10 до 50 мкм.

**Таблица 2**  
Основные параметры для выращивания деталей из сплава In718

Модель	Рабочая зона, мм	Шаг построения, мкм	Мощность, Вт	Производительность, см <sup>3</sup> /ч	Материал
EOSINT M280	250x250x350	20-200	400-1000	20-35	IN718

Примечание. Детали получаются полностью сплавленными при стандартных параметрах и 20 мкм толщине слоя построения.

Селективное лазерное спекание (СЛС) является новым и перспективным способом быстрого изготовления деталей со сложными формами сразу из металлического порошка [1, 2]. Суть способа состоит в послойном спекании порошковых элементов лазерным излучением [3, 4]. Механические свойства объектов, получаемых способом лазерного спекания, дают возможность их использовать в секторах экономики, таких как авиастроение, автомобилестроение, биомедицина [5]. Данная технология практически безотходна и многофункциональна, так как использует достаточно широкий диапазон исходных порошков с размерами частиц от 10 нм до 100 мкм [6, 7]. Технология послойного синтеза дает возможность воспроизводить изделия со значительной степенью точности.

Цель работы: провести экспериментальные исследования по оценке долговечности и прочности образцов, полученных селективным лазерным спеканием в условиях малоциклового усталости в интервале рабочих температур.

### Материалы и методы исследования

Заготовки были получены методом селективного лазерного спекания на установке EOSINT M280 из сплава Inconel 718 и выращивались в направлении, перпендикулярном слоям.

Заготовки из сплава Inconel 718 прошли термообработку по режиму: закалка при  $980 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе (аргон); старение при  $720 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержка 8 ч, охлаждение с печью до  $620^\circ\text{C}$  2 ч, далее выдержка при  $620 \pm 10^\circ\text{C}$ , 8 ч, охлаждение на воздухе (аргон).

На рис. 1 приведена форма рабочей части образца из сплава Inconel 718 для испытания. При достаточном объеме исследуемого материала рекомендуется применять цилиндрические образцы наибольшего диаметра. При испытании материалов, свойства которых в значительной степени зависят от состояния поверхности, проводили обработку поверхности до высоты микронеровностей  $Ra = 0,4$  мкм [8, 9].



Рис. 1. Образец для испытания

Стационарное нагружение образца осуществляли при изменении нагрузки по синусоидальному закону. Каждый образец испытывает попеременно то растяжение, то сжатие. Напряжение в образце, пройдя ряд значений, возвращается к необходимой величине.

Испытания на МЦУ были проведены на высокотемпературном экстензометре LFMZ-50 с базой 12,5 мм в соответствии с ГОСТ 25.502 [8, 10, 11]. При проведении испытаний пользуются методами нагрева образцов в электропечах. Нагрев до приложения нагрузки рекомендуется проводить при номинальной температуре испытания за 30 с с выдержкой при температуре до приложения нагрузки 30 с.

При проведении испытаний фиксировали время до разрушения образцов.

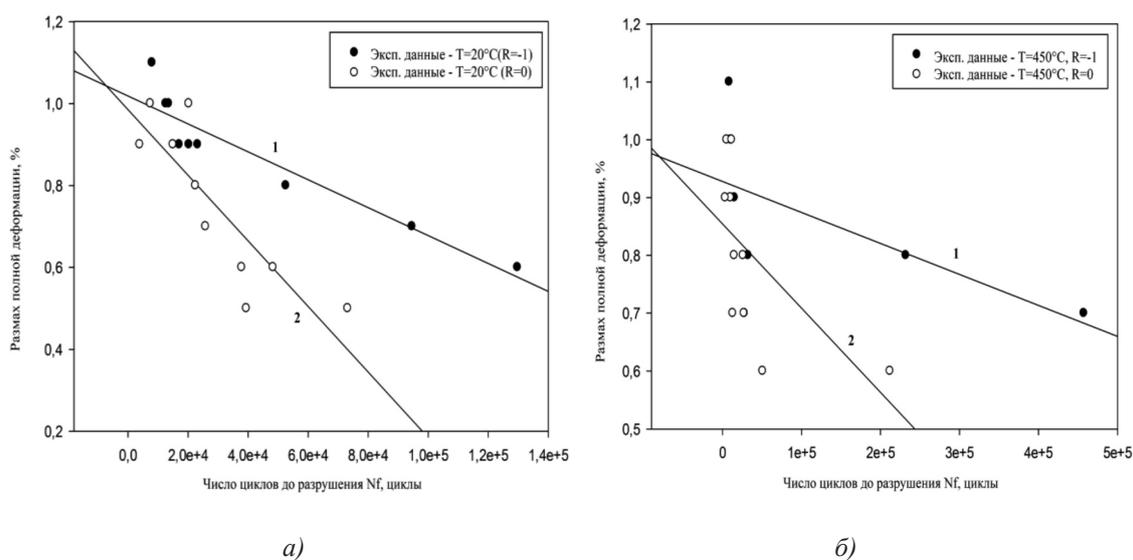


Рис. 2. Зависимость числа циклов до разрушения  $N_f$  от размаха деформации:  
 а –  $T = 20^\circ\text{C}$  (1 – коэффициент нагрузки  $R_c = -1$ ; 2 –  $R_c = 0$ ); б –  $T = 450^\circ\text{C}$  (1 –  $R_c = -1$ ; 2 –  $R_c = 0$ )

**Результаты исследования  
и их обсуждение**

По данным механических испытаний построены диаграммы зависимости напряжения – число циклов ( $\sigma - N_f$ ) при различных температурах. Влияние температуры на внутренние напряжения проходило при многократных нагрузках, выполненных в условиях полного контроля деформации. Использование более длительного нагружения позволяет испытывать материалы при более низких температурах.

Зависимость числа циклов до разрушения  $N_f$  от размаха полной деформации может быть представлена кривой деформации.

Из экспериментальных данных мы видим, что процесс разрушения материала наиболее ощутимо сказывается при больших деформациях и более высоких температурах. Разрушение при малоциклового усталости происходит в широком интервале деформации. Кривые отражают максимальную прочность сплава Inconel 718.

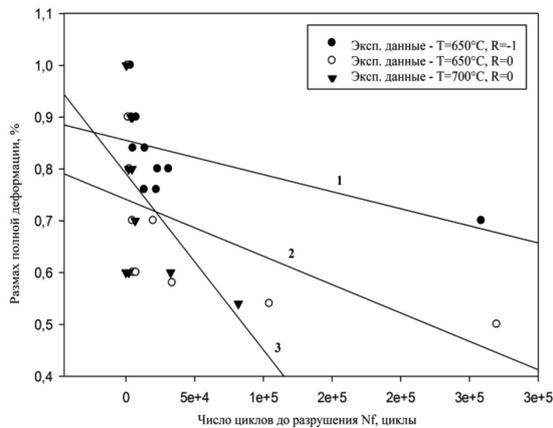


Рис. 3. Зависимость числа циклов до разрушения  $N_f$  от размаха деформации в цикле  $\Delta_\epsilon$ .  $T = 650^\circ\text{C}$  (1 –  $R_\epsilon = -1$ ; 2 –  $R_\epsilon = 0$ );  $T = 700^\circ\text{C}$  (3 –  $R_\epsilon = 0$ )

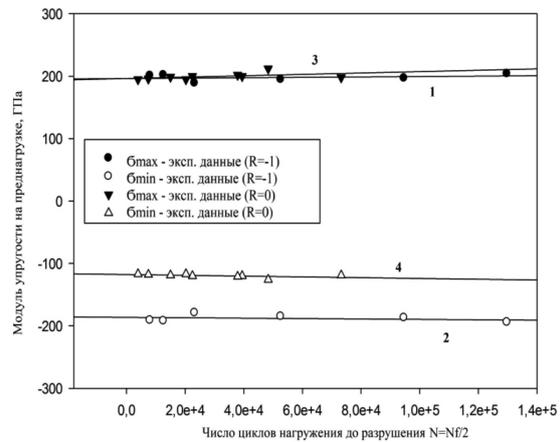
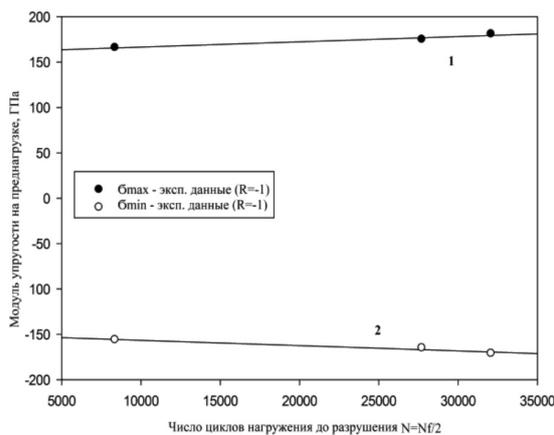
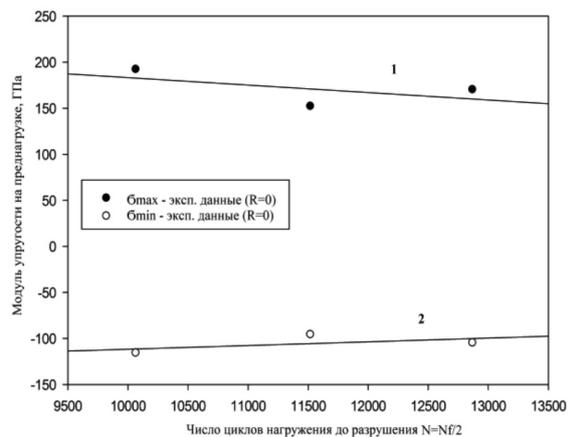


Рис. 4. Зависимость модуля упругости от числа циклов.  $\sigma_{\text{макс}}$  / и  $\sigma_{\text{мин}}$  при  $T = 20^\circ\text{C}$  коэффициент нагрузки  $R_\epsilon = -1$  – кривая 1 по  $\sigma_{\text{макс}}$  и кривая 2 по  $\sigma_{\text{мин}}$ ; коэффициент нагрузки  $R_\epsilon = 0$  – кривая 3 по  $\sigma_{\text{макс}}$  и кривая 4 по  $\sigma_{\text{мин}}$



а)



б)

Рис. 5. Зависимость модуля упругости от числа циклов  $\sigma_{\text{макс}}$  / и  $\sigma_{\text{мин}}$  при  $T = 450^\circ\text{C}$ :  
а – коэффициент нагрузки  $R_\epsilon = -1$  – кривая 1 по  $\sigma_{\text{макс}}$  и кривая 2 по  $\sigma_{\text{мин}}$ ;  
б – коэффициент нагрузки  $R_\epsilon = 0$  – кривая 1 по  $\sigma_{\text{макс}}$  и кривая 2 по  $\sigma_{\text{мин}}$

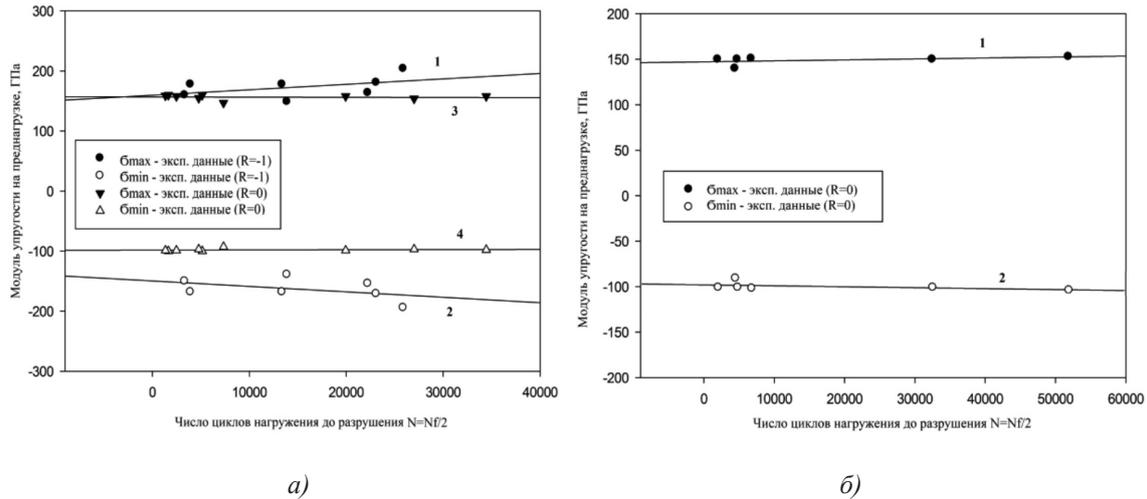


Рис. 6. Зависимость числа циклов  $N = Nf/2$  от модуля упругости (напряжений в цикле  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ ):  
 а –  $T = 650\text{ °C}$ ;  $R_e = -1$  – кривая 1 по  $\sigma_{\max}$  и кривая 2 по  $\sigma_{\min}$ ;  $R_e = 0$  – кривая 3 по  $\sigma_{\max}$   
 и кривая 4 по  $\sigma_{\min}$ ; б –  $T = 700\text{ °C}$ ;  $R_e = 0$  – кривая 1 по  $\sigma_{\max}$  и кривая 2 по  $\sigma_{\min}$

Таблица 3

Механические свойства образцов, изготовленных электроимпульсным плазменным спеканием Inconel 718 [12]

	Предел прочности (Ткомн), МПа	Удлинение до разрыва (Ткомн), %	Предел прочности (Т800 °С), МПа	Удлинение до разрыва (Т800 °С), %	Предел текучести $\sigma_{0,2}$
SPS	1060	46	310	90.44	500

Таблица 4

Механические свойства сплавов In718 и ХН45МВТЮБРид (ЭП718ид) при комнатной температуре

Свойства	IN718 (после т/о)		Пруток ХН45МВТЮБРид (ЭП718ид) по ТУ 14-1-3905-85
	Т1	Т2	
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	1400	1380	1130
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	1150	1240	685
Относительное удлинение $\delta$ , %	15	18	12

Для изучения перспектив практического применения порошковых деталей, полученных с использованием технологии СЛС, представляется весьма важным сравнение их свойств со свойствами порошковых изделий, полученных традиционным методом SPS. Механические свойства образцов, изготовленных электроимпульсным плазменным спеканием порошка на установки SPS-625 в табл. 3 [12].

В табл. 4 приведены данные о механических свойствах ХН45МВТЮБРид (ЭП718ид) (российский жаропрочный железо-никелевый сплав в большом содержании никеля и хрома, с легирующими элементами титан, алюминий, ниобий, молибден, вольфрам. Применяется в высоконагружаемых деталях, работающих при температуре сре-

ды до 700–800 градусов в широком диапазоне климатических условий).

Как видно, свойства образцов, изготовленных СЛС, даже выше, чем изготовленными другим методом.

Таким образом, использование сплава, полученного селективным лазерным спеканием, для аэрокосмической отрасли является актуальным.

### Заключение

На основании испытаний образцов, полученных селективным лазерным спеканием, на малоцикловую усталость в условиях осевого нагружения при различных температурах 20 °С, 450 °С, 650 °С, 700 °С (с коэффициентом нагрузки цикла  $R_e = 0$  и  $R_e = 1$ ) установлено:

1. Процесс разрушения материала наиболее ощутимо сказывается при больших деформациях.

2. Сплав IN718, полученный новыми подходами, в частности селективным лазерным спеканием, обладает высокими прочностными характеристиками при статическом и циклическом деформировании, что обеспечивает долговечность и надежность конструкции при различных рабочих температурах.

3. Технология селективного лазерного спекания является рентабельной альтернативой для изготовления деталей из сплава IN718.

4. Установлено, что сплав In718 обладает более высокими механическими свойствами по сравнению со свойствами прутка из сплава ХН45МВТЮБРид (ЭП718ид).

### Список литературы

1. Кулиш А.М., Мисюров А.И. Изучение особенностей формирования структуры и свойств образцов из сплава In718 при выращивании методом коаксиального лазерного плавления // Студенческая научная весна 2016: Машиностроительные технологии: Всероссийская научно-техническая конференция студентов. 2016. С. 1–7.
2. Zemin Wang, Kai Guan, and Ming Gao. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting. *Journal of Alloys Compounds*. 2012. P. 518–523.
3. Шишковский И.В. Перспективы быстрого прототипирования для изготовления моделей и литейных форм // Литейное производство. 2010. № 6. С. 23–29.
4. Gladush G.G., Smurov I. *Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment*. Berlin: Springer-Verlag. 2011. 534 p.
5. Кузнецов В. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения // CAD/CAM/CAE Observer. 2003. № 4 (13). С. 43–46.
6. Amato K.N., Gaytan S.M., Murr L.E. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. *Acta Materiali*. 2012. № 60. P. 2229–2239.
7. Antsiferova I.V., Babentsova L.P., Komarov S.V. Research of the quality of obtaining stocking from stainless steel by selective laser sintering. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018. № 9 (3). P. 162–171.
8. Голубовский Е.Р., Волков М.Е., Эммаусский Н.М., Шibaев С.А. Экспериментальное исследование малоциклового усталости монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ВЖМ5 при высоких температурах // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Машиностроение и машиноведение. 2015. Т. 19. № 3 (69). С. 119–125.
9. Атрощенко В.В., Смирнов В.В., Чуракова А.А., Гундеров Д.В., Заманова Г.И. Структура и механические свойства образцов из нержавеющей стали, полученных методом селективного спекания // Вестник Башкирского университета. 2016. № 2. С. 258–262.
10. Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов. М.: Авиаздат, 2013. 38 с. [Advisory Circular AVIAREGISTER IAC – № RC-AP-33.15-1].
11. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 8. С. 41–48.
12. Грязнов М.Ю., Шотин С.В., Чувильдеев В.Н. Физико-химические свойства и структура сплава Inconel 718, полученного по технологии послойного лазерного спекания // Физика твердого тела. Вестник Нижегородского ун-та. 2014. № 4 (1). С. 46–51.