

УДК 621.7

Исследования механических свойств и микроструктуры жаропрочного никелевого сплава ЭИ698-ВД в условиях горячего деформирования

Луганенко Тихон Дмитриевич

tlugan04@list.ru

SPIN-код: 2468-5830

Лавриненко Владислав Юрьевич

vladyasha@mail.ru

SPIN-код: 5979-1096

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе приведены исследования жаропрочного никелевого сплава ЭИ698-ВД в контексте разработки технологического процесса высадки головки высокопрочного авиационного крепежа. По результатам изотермических испытаний на сжатие построена диаграмма напряжений материала при различных температурах. Также была изучена микроструктура полученных образцов как до типичной для данного класса материалов термической обработки, так и после. По результатам полученных размеров зерен были построены диаграммы рекристаллизации сплава в установленных в исследовании температурных границах. Показано применение полученных данных при проектировании технологического процесса высадки головки крепежа в ПО QForm.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, деформирование, ГОШ, рекристаллизация, моделирование, QForm, диаграмма деформирования, испытания, микроструктура

Experimental researches of mechanical properties and microstructure of heat-resistant nickel alloy EI698-VD under hot deformation conditions

Luganenko Tikhon Dmitrievich

tlugan04@list.ru

SPIN-code: 2468-5830

Lavrinenko Vladislav Yurievich

vladyasha@mail.ru

SPIN-code: 5979-1096

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents researches of the heat-resistant nickel alloy EI698-VD in the context of the development of the upset forging technological process for the head of high-strength aviation fasteners. Diagrams of the true stresses of the material at various temperatures are constructed based on the results of isothermal compression tests. The microstructure of the obtained images was also studied both before and after heat treatment, which is typical for this class of materials. Based on the results of the obtained grain sizes, diagrams of alloy recrystallization were constructed within the temperature limits established in the research. The application of the obtained data in the design of the technological process of planting the fastener head in the QForm software is also shown.

Keywords: *heat-resistant nickel alloys, deformation, hot forging, recrystallization, simulation, QForm, deformation curve, tests, microstructure*

Введение. Специфические механические свойства жаропрочных никелевых сплавов (такие как жаропрочность и жаростойкость, твердость, усталостная прочность и др.) делают их незаменимыми материалами в авиа и ракетостроении. В современных реалиях, ввиду сложности поставки товаров из-за рубежа, отечественных аналоги иностранных жаропрочных сплавов, используемые для производства авиационного крепежа, в большинстве своем, обрабатываются методами резания из-за отсутствия научно обоснованных режимов обработки подобных материалов давлением. Учитывая высокие требования, предъявляемые к авиационному крепежу, как по прочностным характеристикам, так и по микро и макроструктуре, возникает необходимость их оценки еще на этапе моделирования технологического процесса в современных программных пакетах (ПО QForm). По результатам таких исследований [1] становится возможным получить технологию обработки изделия с заранее прогнозируемыми свойствами с минимальными экономическими затратами.

Материалы и методы. Для проектирования технологических процессов производства авиационного крепежа давлением (высадка головки и накатка резьбы) необходима, во-первых, диаграмма деформирования используемого материала — ЭИ698-ВД. Во-вторых, для оценки изменений микроструктуры необходима диаграмма рекристаллизации сплава [2], как до, так и после типичной для него термообработки.

В качестве образцов для исследования использовались цилиндрические заготовки высотой 15 мм и диаметром 9,6 мм. На установке УС ТРДТ-2024 было проведено 20 экспериментов по изотермической осадке при различном ходе пуансона и различных температурах (см. таблицу) с постоянной скоростью деформирования $0,1 \text{ с}^{-1}$.

Параметры испытаний

Температура испытания, °С	Ход инструмента, мм.					Нобр, шт.	Σ, шт.
1110	9	6,75	4,5	3,3	1,5	5	20
1130	9	6,75	4,5	3,3	1,5	5	
1150	9	6,75	4,5	3,3	1,5	5	
1170	9	6,75	4,5	3,3	1,5	5	

Установка позволяет фиксировать множество параметров в процессе деформации заготовки, которые можно выводить в свободной форме и анализировать в любом ПО.

После, с помощью электроэрозионной обработки, были получены 40 полуцилиндров, половина которых подверглась термической обработке. Далее, для изучения микроструктуры, образцы были запрессованы в полимерную

смолу и отшлифованы до нужной чистоты поверхности на шлифовальной машине. После химического травления шлифов на металлографическом микроскопе 4 ХВ была изучена их микроструктура в программе TourView.

Результаты. По результатам изотермической осадки были составлены диаграммы деформирования сплава ЭИ698-ВД (рис. 1). При этом, не рассматривая участок упругой деформации [3], полученные кривые были аппроксимированы до полиномов третьей степени общего вида.

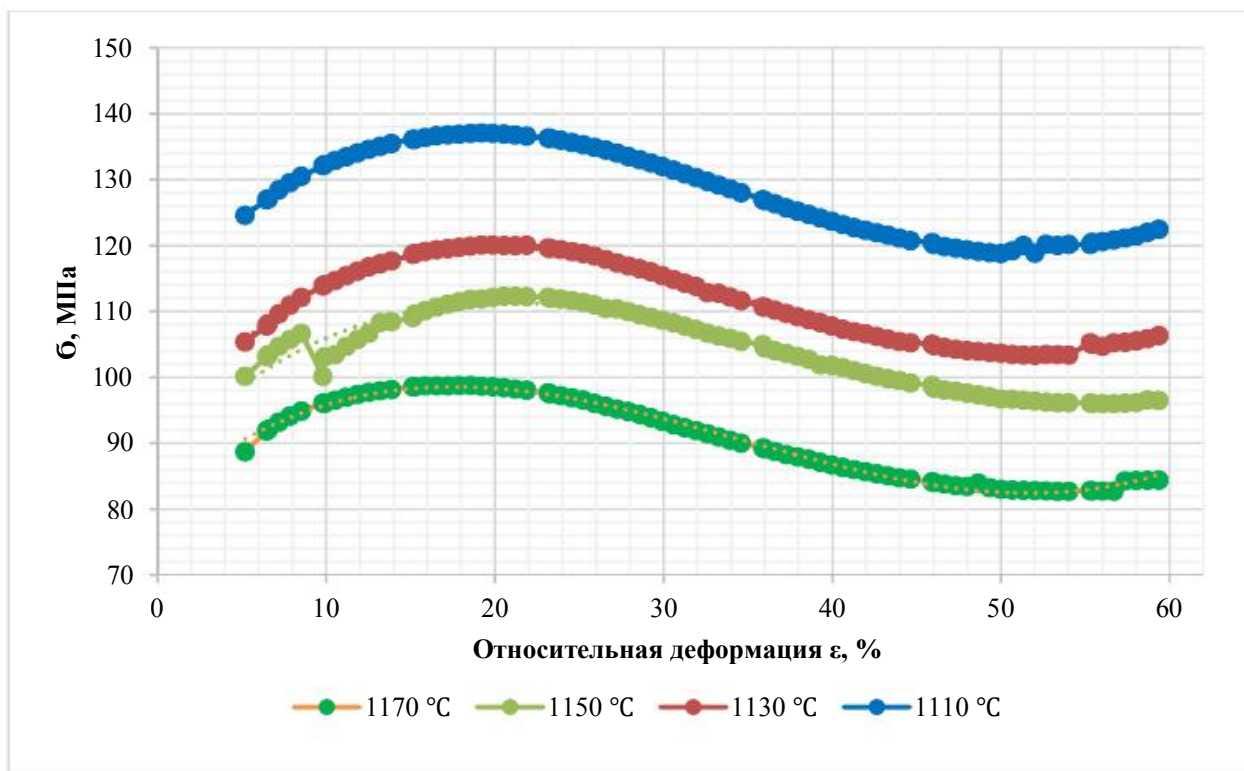


Рис. 1. Диаграмма деформирования жаропрочного никелевого сплава ЭИ698-ВД

Полученные уравнения аппроксимации диаграммы деформирования вида (1) имеют расхождение с действительными данными не более 9 %, что свидетельствует о высокой степени их сходства:

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^3 + B \cdot \varepsilon^2 + C \cdot \varepsilon + D. \quad (1)$$

В процессе изучения микроструктуры после изотермической осадки были определены размеры зерен по ГОСТ 5639–82. В структуре металла также были выявлены «двойники» и «ожерелья». Последние свидетельствуют о произошедшей вторичной рекристаллизации сплава [4] (рис. 2).

По результатам анализа размеров зерна были построены диаграммы рекристаллизации сплава, как до, так и после типичной для него термообработки (рис. 3, А, Б), а на рис. 3, В представлена поверхность, полученная в результате аппроксимации диаграммы рекристаллизации сплава до термической обработки.

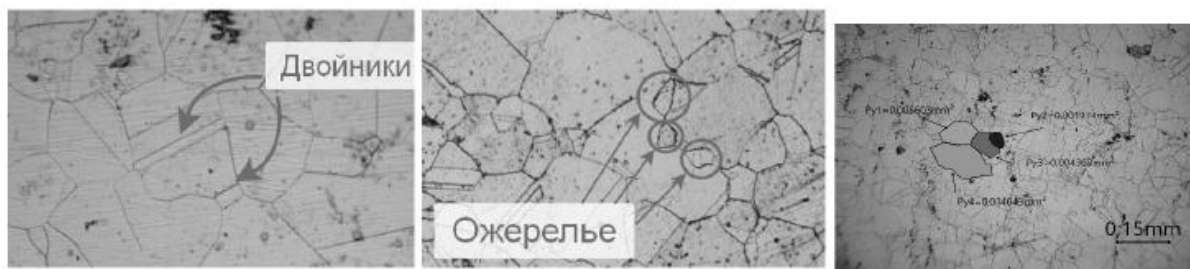


Рис. 2. Микроструктура изотермически деформированного сплава содержит «двойники» и «ожерелья»

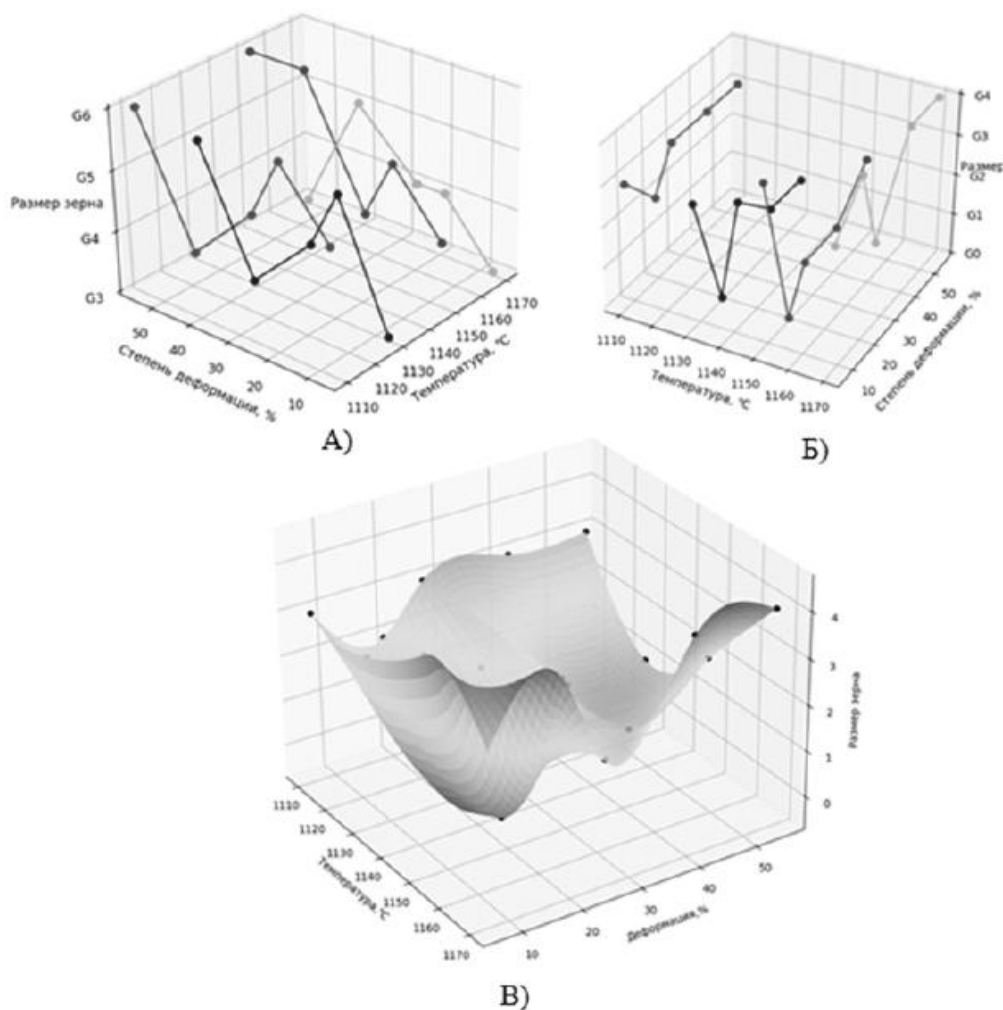


Рис. 3. А — диаграмма рекристаллизации сплава ЭИ698-ВД без термической обработки;
 Б — диаграмма рекристаллизации сплава ЭИ698-ВД после термической обработки;
 В — аппроксимированная поверхность диаграммы рекристаллизации сплава до термической обработки

В среде программирования Python было получено уравнение данной поверхности, имеющее вид (2). При этом максимальное расхождение полученных данных не превышает 19 %, что, учитывая интервальность назначения номера зерна, дает основания считать модель поверхности достаточно точной:

$$\left\{ \begin{array}{l} G = k_1 - k_2 T + k_3 \varepsilon + k_4 T^2 - k_5 T \varepsilon - k_6 \varepsilon^2 + k_7 T^2 \varepsilon + k_8 T \varepsilon^2 - k_9 \varepsilon^3; \\ 1170 \geq T \geq 1110; \\ 55 \geq \varepsilon \geq 7; \\ G \in Z \end{array} \right. \quad (2)$$

где G — номер зерна; $k_1 \dots k_9$ — коэффициенты уравнения поверхности; T — температура деформации, °C; ε — степень деформации заготовки, %.

Обсуждение. Получение математических зависимостей для диаграмм деформирования и рекристаллизации (1), (2), дает возможность интегрировать экспериментальные данные в многие программные комплексы [5] и, в частности, использовать их для проектирования технологических процессов обработки давлением сплава ЭИ698-ВД.

Первичный расчет процесса высадки головки авиационного крепежа дает распределения степени деформации и температуры по объему заготовки (рис. 4). По полученным данным, применяя дополнительные программные возможности ПО QForm, возможно получить и распределение размеров зерен. При этом стоит учесть, что, получая аналогичным способом уравнения поверхности диаграммы рекристаллизации сплава после термообработки, также возможно определение размеров зерен заготовки.

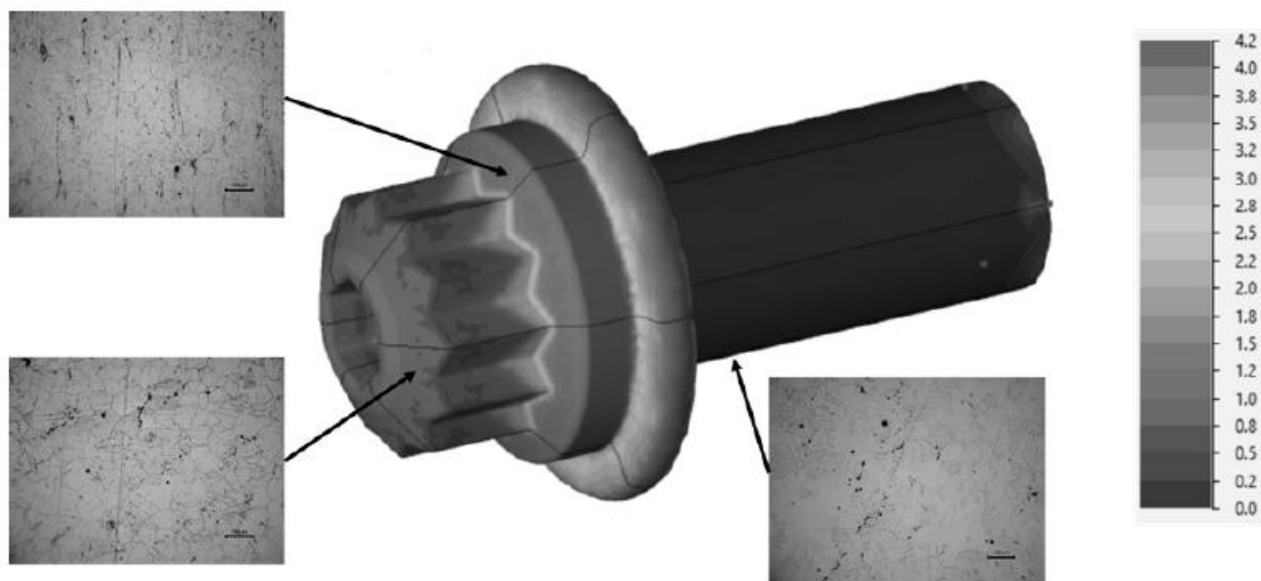


Рис. 4. Прогнозирование эволюции микроструктуры в результате высадки головки авиационного крепежа в ПО QForm

Закключение. Проведенные исследования имеют широкие возможности применения для самых разнообразных сплавов. Относительно малое количество необходимых экспериментов значительно упрощает такой способ проектирования технологических процессов обработки давлением заготовок из новых сплавов. Исследуя лишь интервал необходимых температур, при фиксированной скорости деформирования, значительно сокращаются время, трудоемкость, а следовательно, и экономические затраты производства деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Горбачев И.И., Пасынков А.Ю., Попов В.В. Моделирование эволюции карбонитридных частиц сложного состава при горячей деформации низколегированной стали. *Физика металлов и металловедение*, 2018, т. 119, № 8, с. 817–826.
- [2] Чурюмов А.Ю., Поздняков А.В., Чурюмова Т.А., Чеверикин В.В. Горячая пластическая деформация жаропрочной аустенитной стали AISI 310S. Сообщение 1. Моделирование напряжения течения и динамической рекристаллизации. *Черные металлы*, 2020, № 8.
- [3] Liu Y.X., Lin Y.C., Zhou Y. 2D cellular automaton simulation of hot deformation behavior in a Ni-based superalloy under varying thermal-mechanical conditions. *Mater. Sci. Eng. A*, 2017, vol. 691, pp. 88–99.
- [4] Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. *Металловедение и термическая обработка стали. Т. 2. Основы термической обработки (справочник)*. Москва, Металлургия, 1983, 368 с.
- [5] Чурюмов А.Ю., Поздняков А.В. Моделирование эволюции микроструктуры металлических материалов в процессе горячей пластической деформации и термической обработки. *Физика металлов и металловедение*, 2020, т. 121, № 11, с. 1162–1186.
<https://doi.org/10.31857/S0015323020110030>