

Научная статья

УДК 669.017.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-91-100

## ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ОБРАЗЦА И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ДЖОНСОНА–КУКА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ NiCoCrWNbAlTiCRe

И.И. Власов<sup>1</sup>, Г.С. Севальнев<sup>1</sup>, О.А. Дьяченко<sup>1</sup>, И.В. Валухова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Представлен комплексный анализ влияния размера образца и скорости деформации на параметры модели Джонсона–Кука для высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe. Механические испытания на растяжение проведены на образцах диаметром 3, 5 и 7 мм при скоростях деформации от 0,25 до 10 мм/мин. Установлено, что диаметр образца существенно влияет на параметры модели: коэффициент деформационного упрочнения ( $B$ ) изменяется от 660 МПа для образцов Ø5 мм до 915 МПа для образцов Ø3 мм, а предел текучести ( $A$ ) варьируется от 462 до 596 МПа.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийные сплавы, модель Джонсона–Кука, деформационное упрочнение, механические свойства, размерный эффект, скорость деформации

**Для цитирования:** Власов И.И., Севальнев Г.С., Дьяченко О.А., Валухова И.В. Влияние диаметра образца и скорости деформации на параметры модели Джонсона–Кука высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCRe // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 91–100. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-91-100.

Scientific article

## INFLUENCE OF SPECIMEN DIAMETER AND STRAIN RATE ON JOHNSON–COOK MODEL PARAMETERS OF A HIGH-ENTROPY ALLOY OF THE NiCoCrWNbAlTiCRe SYSTEM

I.I. Vlasov<sup>1</sup>, G.S. Sevalnev<sup>1</sup>, O.A. Dyachenko<sup>1</sup>, I.V. Valuhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** This paper presents a comprehensive analysis of the influence of specimen size and strain rate on the Johnson–Cook model parameters for a high-entropy alloy of the NiCoCrWNbAlTiCRe system. Tensile tests were performed on specimens with diameters of 3, 5, and 7 mm at strain rates from 0,25 to 10 mm/min. It was determined that specimen diameter significantly affects the model parameters: the strain hardening coefficient ( $B$ ) varies from 660 MPa for Ø5 mm specimens to 915 MPa for Ø3 mm specimens, while the yield strength ( $A$ ) ranges from 462 to 596 MPa.

**Keywords:** high-entropy alloys, Johnson–Cook model, strain hardening, mechanical properties, size effect, strain rate

**For citation:** Vlasov I.I., Sevalnev G.S., Dyachenko O.A., Valuhova I.V. Influence of specimen diameter and strain rate on Johnson–Cook model parameters of high-entropy alloy of the NiCoCrWNbAlTiCRe system. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 91–100. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-91-100.

## Введение

Развитие современных высокотемпературных материалов для авиационной и космической техники требует глубокого понимания их механического поведения при различных условиях нагружения [1, 2]. Высокоэнтропийные сплавы, представляющие собой многокомпонентные системы с близкими концентрациями элементов, демонстрируют уникальное сочетание прочности, пластичности и жаростойкости [3–8]. Концепция разработки высокоэнтропийного сплава основана на обеспечении высокой энтропии смешивания компонентов системы [7, 8], в результате чего открываются новые возможности для создания материалов с беспрецедентными свойствами [9]. Система NiCoCrWNbAlTiCrRe – перспективна для создания материалов, работающих в условиях высоких температур и механических нагрузок.

Модель Джонсона–Кука, предложенная в 1983 г., стала одной из наиболее широко используемых конститутивных моделей для описания поведения металлических материалов [10]. Модель позволяет отдельно учитывать влияние деформации, скорости деформации и температуры на напряжение течения:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}))(1 - (\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0})^m),$$

где  $\sigma$  – напряжение течения;  $A$  – предел текучести;  $B$  – коэффициент деформационного упрочнения;  $n$  – показатель деформационного упрочнения;  $C$  – коэффициент скоростного упрочнения;  $m$  – показатель температурного размягчения;  $\varepsilon$  – пластическая деформация;  $\varepsilon_0$  – скорость деформации;  $T$  – температура.

Влияние размера образца на механические свойства металлических материалов известно как размерный эффект [11, 12]. Для традиционных конструкционных материалов установлено, что уменьшение размера образца может приводить к изменению прочностных характеристик и характера деформационного упрочнения. Однако для высокоэнтропийных сплавов систематические исследования влияния геометрических размеров на параметры модели Джонсона–Кука ограничены.

Скорость деформации является критическим параметром, влияющим на механическое поведение материалов [13, 14]. Исследования показывают, что увеличение скорости деформации обычно приводит к повышению напряжения течения, что связано с ограниченным временем для релаксационных процессов в материале.

Цель данной работы – комплексное исследование влияния диаметра образца (3, 5 и 7 мм) и скорости деформации (0,25–10 мм/мин) на параметры модели Джонсона–Кука высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCrRe при комнатной температуре.

## Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали многокомпонентный высокоэнтропийный сплав системы NiCoCrWNbAlTiCrRe. Химический состав сплава характеризуется близкими концентрациями основных компонентов с суммарным содержанием легирующих элементов не более 7 % (по массе).

Образцы для механических испытаний изготавливали токарной обработкой с тремя различными диаметрами рабочей части: 3, 5 и 7 мм. Длина рабочей части составляла 25 мм для всех типов образцов. Геометрические параметры образцов соответствовали требованиям ГОСТ 1497–2023.

Механические испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине с максимальным усилием 100 кН при комнатной температуре  $20 \pm 2$  °С. Для каждого диаметра образца испытания проводили при четырех различных скоростях движения траверсы: 0,25; 0,5; 1,0 и 10 мм/мин.

Деформацию измеряли с помощью экстензометра с базой 25 мм и точностью  $\pm 0,5$  %. Нагрузку регистрировали встроенным силоизмерительным датчиком с погрешностью не более 0,5 % от измеряемого значения. Данные записывали с частотой 10 Гц в течение всего испытания до разрушения образца.

По результатам испытаний определяли следующие характеристики:

- условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ , МПа) при остаточной деформации 0,2 %;
- предел прочности ( $\sigma_b$ , МПа);
- относительное удлинение ( $\delta_5$ , %).

Параметры модели Джонсона–Кука определяли методом наименьших квадратов путем аппроксимации экспериментальных кривых деформирования в координатах «истинное напряжение–истинная деформация». Истинные напряжения и деформации рассчитывали по формулам:

$$\sigma_i = \sigma_n(1 + \varepsilon_n);$$

$$\varepsilon_i = \ln(1 + \varepsilon_n),$$

где  $\sigma_n$  и  $\varepsilon_n$  – номинальное напряжение и деформация.

Для определения параметров  $A$ ,  $B$  и  $n$  использовали упрощенную форму модели Джонсона–Кука при комнатной температуре и постоянной скорости деформации:

$$\sigma = A + B\varepsilon^n.$$

Статистическую обработку результатов проводили с расчетом средних значений, стандартных отклонений и коэффициентов вариации. Доверительный интервал составлял 95 %.

### Результаты и обсуждение

Результаты механических испытаний на растяжение высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCr при различных скоростях деформации представлены в табл. 1. Испытания проводили на образцах трех диаметров (3, 5 и 7 мм) с целью оценки влияния размерного фактора на механические характеристики материала.

Таблица 1

**Механические свойства образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCr с различными диаметрами рабочей части и скоростью движения траверсы**

| Диаметр рабочей части $d_0$ , мм | Скорость движения траверсы, мм/мин | Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа | Предел прочности $\sigma_b$ , МПа | Относительное удлинение $\delta_5$ , % |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| 3                                | 0,25                               | 463                                   | 931                               | 39                                     |
|                                  | 0,5                                | 469                                   | 935                               | 47                                     |
|                                  | 1                                  | 463                                   | 931                               | 42                                     |
|                                  | 10                                 | 498                                   | 940                               | 42                                     |
| Среднее значение                 | –                                  | 462±33                                | 928±15                            | 43±3                                   |
| CV, %                            |                                    | 7,2                                   | 1,6                               | 7,0                                    |
| 5                                | 0,25                               | 430                                   | 918                               | 51                                     |
|                                  | 0,5                                | 600                                   | 1015                              | 51                                     |
|                                  | 1                                  | 750                                   | 1000                              | 48                                     |
|                                  | 10                                 | 607                                   | 1000                              | 49                                     |
| Среднее значение                 | –                                  | 597±131                               | 984±45                            | 50±1                                   |
| CV, %                            |                                    | 22,0                                  | 4,6                               | 2,0                                    |
| 7                                | 0,25                               | 494                                   | 967                               | 45                                     |
|                                  | 0,5                                | 524                                   | 980                               | 42                                     |
|                                  | 1                                  | 469                                   | 918                               | 38                                     |
|                                  | 10                                 | 545                                   | 966                               | 44                                     |
| Среднее значение                 | –                                  | 499±34                                | 952±26                            | 42±3                                   |
| CV, %                            |                                    | 6,8                                   | 2,7                               | 7,1                                    |

Примечание. CV – коэффициент вариации.

Условный предел текучести демонстрирует выраженную зависимость от диаметра образца. Максимальные значения получены для образцов  $\varnothing 5$  мм, где средний предел текучести составляет  $597 \pm 131$  МПа с диапазоном значений от 430 до 750 МПа. Такой значительный разброс ( $CV = 22\%$ ) обусловлен высокой чувствительностью образцов данного размера к скорости деформации. Для образцов диаметров 3 и 7 мм средние значения предела текучести составляют  $462 \pm 33$  и  $499 \pm 34$  МПа соответственно с более низкими коэффициентами вариации (7,2 и 6,8 %). Значения предела текучести соответствуют типичным значениям для никелевых жаропрочных сплавов [15, 16].

Предел прочности повышается с увеличением диаметра образца – от 928 МПа для  $\varnothing 3$  мм до 984 МПа для  $\varnothing 5$  мм, с последующим небольшим снижением до 952 МПа для  $\varnothing 7$  мм. Следует отметить, что предел прочности характеризуется минимальным разбросом значений: коэффициент вариации составляет от 1,6 до 4,6 %, что свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов и незначительной зависимости этого параметра от скорости деформации.

Относительное удлинение варьируется от 38 до 51 %, что свидетельствует о хорошей пластичности исследуемого сплава. Максимальные значения пластичности характерны для образцов  $\varnothing 5$  мм (среднее значение  $50 \pm 1\%$ ), что, по-видимому, связано с оптимальным соотношением между поверхностными и объемными эффектами при данном размере образца. Образцы диаметрами 3 и 7 мм демонстрируют сопоставимые значения пластичности – соответственно  $43 \pm 3$  и  $42 \pm 3\%$ .

Влияние скорости деформации на механические свойства проявляется по-разному для образцов различных диаметров. Для образцов  $\varnothing 3$  мм увеличение скорости с 0,25 до 10 мм/мин приводит к повышению предела текучести на 8 % (с 463 до 498 МПа) и предела прочности на 1 % (с 931 до 940 МПа). Для образцов  $\varnothing 5$  мм влияние скорости наиболее выражено: предел текучести при скорости 1 мм/мин достигает максимального значения 750 МПа, что на 74 % больше минимального значения при скорости 0,25 мм/мин. Образцы  $\varnothing 7$  мм демонстрируют умеренное влияние скорости – с повышением предела текучести на 16 % в исследуемом диапазоне скоростей.

Полученные значения относительного удлинения сопоставимы с данными для других высокоэнтропийных сплавов с гранецентрированной кубической структурой. Например, сплав системы CoCrFeMnNi демонстрирует относительное удлинение до 60 % при комнатной температуре с выдающейся вязкостью разрушения при криогенных температурах [17, 18].

На основе экспериментальных кривых деформирования определены параметры модели Джонсона–Кука для всех исследованных режимов испытаний. Результаты представлены в табл. 2.

Параметр  $A$  представляет собой предел текучести материала по модели Джонсона–Кука. Средние значения составляют: 462 МПа – для образцов  $\varnothing 3$  мм, 596 МПа – для образцов  $\varnothing 5$  мм и 508 МПа – для образцов  $\varnothing 7$  мм. Наблюдается немонотонная зависимость параметра  $A$  от диаметра с максимумом для образцов среднего размера.

Для образцов  $\varnothing 3$  мм разброс значений параметра  $A$  составляет 417–498 МПа (19 %), что свидетельствует об умеренной чувствительности к скорости деформации. Образцы  $\varnothing 5$  мм демонстрируют максимальный разброс 430–750 МПа (74 %), причем максимальное значение достигается при скорости 1 мм/мин. Это может быть связано с реализацией специфических механизмов деформации при данном сочетании размера образца и скорости нагружения. Образцы  $\varnothing 7$  мм характеризуются относительно стабильным поведением с разбросом значений 16 %.

Немонотонная зависимость параметра  $A$  от диаметра может объясняться конкуренцией различных эффектов. Для образцов малого диаметра существенное значение имеют поверхностные эффекты и градиенты напряжений, которые могут снижать эффективный предел текучести. При среднем диаметре достигается оптимальное соотношение между

объемными и поверхностными эффектами, приводящее к максимальным значениям. Для крупных образцов могут проявляться эффекты структурной неоднородности на макроуровне.

Таблица 2

**Параметры модели Джонсона-Кука высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrRe при разных диаметрах образца и скорости деформации**

| Скорость деформации, мм/мин                                                                                                                                                                                                                                                                       | <i>A</i> , МПа | <i>B</i> , МПа | <i>n</i> | <i>C</i> , МПа | <i>m</i> | <i>B/A</i> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------|----------------|----------|------------|
| Образец Ø3 мм                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                |                |          |                |          |            |
| 0,25                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 417            | 989            | 0,21     | 0,10           | 1,28     | 2,37       |
| 0,5                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 469            | 793            | 0,20     | 0,10           | 1,11     | 1,69       |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 463            | 989            | 0,19     | 0,10           | 1,28     | 2,14       |
| 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 498            | 887            | 0,15     | 0,04           | 0,93     | 1,78       |
| Среднее значение                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 462            | 915            | 0,19     | 0,09           | 1,15     | 1,99       |
| Образец Ø5 мм                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                |                |          |                |          |            |
| 0,25                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 430            | 887            | 0,19     | 0,07           | 1,11     | 2,06       |
| 0,5                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 599            | 584            | 0,20     | 0,09           | 1,12     | 0,97       |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 750            | 584            | 0,14     | 0,03           | 1,09     | 0,78       |
| 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 606            | 584            | 0,19     | 0,05           | 1,05     | 0,96       |
| Среднее значение                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 596            | 660            | 0,18     | 0,06           | 1,09     | 1,20       |
| Образец Ø7 мм                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                |                |          |                |          |            |
| 0,25                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 494            | 782            | 0,20     | 0,07           | 0,75     | 1,58       |
| 0,5                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 524            | 782            | 0,19     | 0,07           | 0,69     | 1,49       |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 469            | 782            | 0,17     | 0,07           | 0,74     | 1,67       |
| 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 545            | 782            | 0,14     | 0,05           | 1,00     | 1,43       |
| Среднее значение                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 508            | 782            | 0,18     | 0,07           | 0,80     | 1,54       |
| Примечание. <i>A</i> – предел текучести; <i>B</i> – коэффициент деформационного упрочнения; <i>n</i> – показатель деформационного упрочнения; <i>C</i> – коэффициент скоростного упрочнения; <i>m</i> – показатель температурного размягчения; <i>B/A</i> – коэффициент интенсивности упрочнения. |                |                |          |                |          |            |

Коэффициент *B* характеризует способность материала к упрочнению в процессе пластической деформации. Установлена четкая зависимость параметра *B* от размера образца: максимальное значение 915 МПа – для образцов Ø3 мм, минимальное 660 МПа – для образцов Ø5 мм и промежуточное 782 МПа – для образцов Ø7 мм.

Образцы малого диаметра демонстрируют наивысшую способность к деформационному упрочнению. Значения параметра *B* варьируются от 793 до 989 МПа в зависимости от скорости деформации. Высокая способность к упрочнению, по-видимому, связана с более интенсивным накоплением дислокаций в условиях ограниченного объема материала и формированием градиентных дислокационных структур вблизи поверхности образца.

Характерной особенностью образцов Ø5 мм является резкое снижение параметра *B* при увеличении скорости деформации >0,25 мм/мин. При низкой скорости (0,25 мм/мин) параметр *B* равен 887 МПа, что близко к значениям для образцов Ø3 мм, однако при скорости ≥0,5 мм/мин значение стабилизируется на уровне 584 МПа. Такое поведение нетипично для металлических материалов и может указывать на изменение доминирующих механизмов деформации.

Для образцов Ø7 мм параметр *B* остается постоянным (782 МПа) независимо от скорости деформации во всем исследованном диапазоне. Это свидетельствует о стабилизации механизмов деформационного упрочнения при достижении определенного критического размера образца, когда размерные эффекты становятся несущественными.

Параметр  $n$  определяет характер зависимости напряжения течения от степени деформации и для исследуемого сплава находится в диапазоне 0,14–0,21. Средние значения составляют: 0,19 – для образцов Ø3 мм и 0,18 – для образцов диаметрами 5 и 7 мм, что характерно для умеренного типа упрочнения никелевых жаропрочных сплавов.

Наблюдается общая закономерность снижения показателя  $n$  с увеличением скорости деформации для всех типов образцов. При максимальной скорости 10 мм/мин значения  $n$  достигают минимума 0,14–0,15 независимо от диаметра образца. Снижение показателя  $n$  при высоких скоростях указывает на более равномерный характер упрочнения, что, по-видимому, связано с ограниченным временем для локализации деформации и термически активируемых процессов.

Для образцов Ø3 мм показатель  $n$  варьируется от 0,21 при низкой скорости до 0,15 при высокой, демонстрируя наибольшую чувствительность к скорости деформации. Образцы диаметрами 5 и 7 мм показывают схожее поведение с несколько меньшим диапазоном изменения параметра  $n$ .

Значения параметра  $n$  в диапазоне 0,15–0,21 согласуются с научно-техническими литературными данными для жаропрочных никелевых сплавов [18, 19], где показатель упрочнения обычно находится в пределах 0,1–0,3. Более низкие значения  $n$  (~0,15) при высоких скоростях деформации указывают на переход к более линейному характеру упрочнения, типичному для условий динамического нагружения.

Отношение  $B/A$  является комплексной характеристикой, определяющей относительную способность материала к деформационному упрочнению по сравнению с исходным пределом текучести. Средние значения составляют: 1,99 – для образцов Ø3 мм; 1,20 – для образцов Ø5 мм и 1,54 – для образцов Ø7 мм.

Максимальный коэффициент  $B/A$  для образцов Ø3 мм (до 2,37) указывает на их способность к упрочнению. Это означает, что напряжение течения может увеличиться более чем в 2 раза относительно начального предела текучести в процессе деформации. Такое поведение характерно для материалов с высокой плотностью препятствий для движения дислокаций и активными механизмами дислокационного взаимодействия.

Образцы Ø5 мм демонстрируют поведение с коэффициентом  $B/A < 1$  при высоких скоростях деформации (0,78–0,97 при скорости деформации  $\geq 0,5$  мм/мин). Значения  $B/A < 1$  означают, что коэффициент упрочнения меньше предела текучести, что не типично для обычных металлических материалов. Это может указывать на реализацию особых механизмов деформации, таких как динамическое разупрочнение или переориентация структуры при данном сочетании размера и скорости деформации.

Для образцов Ø7 мм коэффициент  $B/A$  стабилизируется в диапазоне 1,43–1,67, что типично для объемных металлических материалов с установившимися механизмами пластической деформации.

Параметр  $C$  характеризует чувствительность напряжения течения к логарифму скорости деформации. Полученные значения (0,03–0,10) указывают на относительно низкую скоростную чувствительность исследуемого высокоэнтропийного сплава при комнатной температуре.

Средние значения параметра  $C$  составляют: 0,09 – для образцов Ø3 мм; 0,06 – для образцов Ø5 мм и 0,07 – для образцов Ø7 мм. Образцы малого диаметра демонстрируют наибольшую скоростную чувствительность, что может быть обусловлено более выраженными градиентами напряжений и активацией дополнительных, скоростно-зависимых механизмов деформации.

Характерной особенностью для всех типов образцов является резкое снижение параметра  $C$  при максимальной скорости деформации (10 мм/мин). Значения параметра  $C$  при этой скорости снижаются до 0,04–0,05, что может указывать на смену доминирующих механизмов деформации. При высоких скоростях термически активируемые

процессы (переползание дислокаций, диффузионная аккомодация) не успевают реализоваться, что приводит к снижению скоростной зависимости.

Для образцов  $\varnothing 7$  мм параметр  $C$  остается практически постоянным (0,07) в широком диапазоне скоростей 0,25–1,0 мм/мин, что свидетельствует о стабильном механизме скоростного упрочнения для крупных образцов в квазистатическом режиме нагружения.

Низкие значения параметра  $C$  ( $<0,1$ ) являются типичными для металлических материалов при комнатной температуре и квазистатическом нагружении. Для сравнения: при динамическом нагружении (скорость деформации  $>10^3 \text{ с}^{-1}$ ) значения параметра  $C$  для никелевых сплавов [19] могут достигать 0,02–0,05, а при высокотемпературной деформации: 0,1–0,2.

Параметр  $m$  определяет чувствительность материала к температуре по модели Джонсона–Кука. Несмотря на то что все испытания проводили при комнатной температуре, этот параметр определяли для полноты описания конститутивной модели на основе дополнительных допущений о температурной зависимости.

Средние значения параметра  $m$  составляют: 1,15 – для образцов  $\varnothing 3$  мм; 1,09 – для образцов  $\varnothing 5$  мм и 0,80 – для образцов  $\varnothing 7$  мм. Наблюдается тенденция снижения параметра  $m$  с увеличением диаметра образца, что может косвенно указывать на улучшение термической стабильности при больших размерах образца.

Значения параметра  $m$  в диапазоне 1,0–1,3 для образцов диаметрами 3 и 5 мм соответствуют типичным значениям для никелевых сплавов [19]. Сниженные значения параметра  $m$  для образцов  $\varnothing 7$  мм (0,69–1,00; среднее значение 0,80) могут указывать на меньшую чувствительность к температурным эффектам, что является благоприятным фактором для высокотемпературных применений.

Следует отметить, что для корректного определения параметра  $m$  необходимы испытания при различных температурах. Полученные в данной работе значения следует рассматривать как оценочные, требующие верификации при высокотемпературных испытаниях.

Наблюдаемые закономерности влияния диаметра образца на параметры модели Джонсона–Кука могут быть объяснены действием нескольких физических механизмов.

В образцах малого диаметра градиенты деформации и напряжений от поверхности к центру образца более выражены. Это приводит к формированию градиентных дислокационных структур с повышенной плотностью дислокаций вблизи поверхности. Геометрически необходимые дислокации, возникающие для аккомодации градиентов деформации, вносят дополнительный вклад в упрочнение, что объясняет более высокие значения параметра  $B$  для образцов  $\varnothing 3$  мм.

Отношение площади поверхности к объему образца увеличивается с уменьшением диаметра. Свободная поверхность является источником дислокаций и облегчает их выход, что может влиять на процессы деформации и упрочнения. Для образцов  $\varnothing 3$  мм это отношение в 2,3 раза больше, чем для образцов  $\varnothing 7$  мм, что может объяснять различия в деформационном поведении.

В образцах большего объема вероятность присутствия структурных дефектов (пор, включений, неоднородностей) выше, что может приводить к более раннему зарождению микротрещин и изменению характера разрушения. Это может объяснять некоторое снижение прочностных характеристик для крупных образцов.

В образцах малого диаметра развитие полос скольжения ограничено геометрическими размерами, что может способствовать более однородному распределению деформации и повышению способности к упрочнению.

Комбинация этих эффектов определяет наблюдаемую немонотонную зависимость механических свойств и параметров модели от диаметра образца, с максимумом предела текучести для образцов среднего размера и максимальной способностью к упрочнению для образцов малого диаметра.

### Заключения

Проведено комплексное исследование влияния диаметра образца и скорости деформации на параметры модели Джонсона–Кука высокоэнтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiCrRe. Установлены следующие основные закономерности:

- размерный эффект существенно влияет на параметры модели Джонсона–Кука. Коэффициент деформационного упрочнения  $B$  максимален для образцов малого диаметра (915 МПа – для  $\varnothing 3$  мм) и снижается до 660 МПа для образцов  $\varnothing 5$  мм и 782 МПа для образцов  $\varnothing 7$  мм. Параметр  $A$  (предел текучести) демонстрирует немонотонную зависимость с максимумом 596 МПа для образцов среднего диаметра;

- коэффициент интенсивности упрочнения  $B/A$  максимален для образцов малого диаметра (среднее значение 1,99), что указывает на их наибольшую способность к деформационному упрочнению. Для образцов диаметрами 5 и 7 мм этот коэффициент составляет 1,20 и 1,54 соответственно;

- показатель деформационного упрочнения  $n$  находится в диапазоне 0,14–0,21 для всех исследованных образцов, что характерно для умеренного типа упрочнения никелевых жаропрочных сплавов. Наблюдается устойчивая тенденция снижения параметра  $n$  с увеличением скорости деформации для всех типов образцов;

- скоростная чувствительность материала относительно низкая (параметр  $C = 0,03–0,10$ ), что типично для квазистатического нагружения при комнатной температуре. Образцы малого диаметра демонстрируют наибольшую скоростную чувствительность (среднее значение  $C = 0,09$ );

- образцы  $\varnothing 5$  мм демонстрируют аномальное поведение при высоких скоростях деформации с резким снижением коэффициента  $B$  и достижением значений  $B/A < 1$ , что нетипично для металлических материалов и требует дальнейшего исследования физических механизмов;

- образцы  $\varnothing 7$  мм характеризуются наибольшей стабильностью параметров: постоянное значение  $B = 782$  МПа независимо от скорости деформации, стабильный коэффициент  $C = 0,07$  в широком диапазоне скоростей, что свидетельствует о минимизации размерных эффектов.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для корректного применения модели Джонсона–Кука при численном моделировании процессов обработки давлением высокоэнтропийных сплавов. Установлено, что параметры модели зависят от размера образца, что необходимо учитывать при масштабировании результатов лабораторных испытаний на реальные изделия. Для образцов наименьшего размера ( $\varnothing 3$  мм) характерна максимальная способность к деформационному упрочнению, что может быть использовано при проектировании тонкостенных конструкций. Образцы среднего размера ( $\varnothing 5$  мм) демонстрируют максимальный предел текучести, но требуют особого внимания из-за аномального поведения при высоких скоростях деформации. Крупные образцы ( $\varnothing 7$  мм) показывают наиболее стабильное и предсказуемое поведение, близкое к объемным материалам.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S2. С. 3–10.
2. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S1. С. 3–9.
3. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 15–29. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.

4. Капланский Ю.Ю., Мазалов П.Б. Мировые тенденции развития тугоплавких высокоэнтропийных сплавов для теплонагруженных узлов аэрокосмической техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 30–42. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
5. Севальнев Г.С., Коробова Е.Н., Дворецков Р.М. и др. Влияние степени дисперсности структуры мартенсита и размера карбидной фазы на фрикционное взаимодействие в условиях сухого трения скольжения высокоуглеродистой комплексно-легированной стали // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (112). С. 15–26. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.
6. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). С. 3–14. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
7. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nature Reviews Materials*. 2019. Vol. 4. P. 515–534.
8. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J. et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes // *Advanced Engineering Materials*. 2004. Vol. 6 (5). P. 299–303.
9. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511.
10. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. 1983. Vol. 21. P. 541–547.
11. Armstrong R.W., Walley S.M. High strain rate properties of metals and alloys // *International Materials Reviews*. 2008. Vol. 53 (3). P. 105–128.
12. Voyiadjis G.Z., Abed F.H. Microstructural based models for bcc and FCC metals with temperature and strain rate dependency // *Mechanics of Materials*. 2005. Vol. 37. P. 355–378.
13. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials // *Progress in Materials Science*. 2006. Vol. 51. P. 427–556.
14. Khan A.S., Huang S. Continuum theory of plasticity. John Wiley & Sons, 1995. 420 p.
15. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading // *Proceedings of the Physical Society B*. 1949. Vol. 62 (11). P. 676–700.
16. Lin Y.C., Chen X.M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working // *Materials & Design*. 2011. Vol. 32. P. 1733–1759.
17. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D. et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. Vol. 345 (6201). P. 1153–1158.
18. Otto F., Dlouhý A., Somsen C. et al. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 5743–5755.
19. McQueen H.J., Ryan N.D. Constitutive analysis in hot working // *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 322. P. 43–63.

### References

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Rare metals and rare-earth elements are materials for modern and future high technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. S2, pp. 3–10.
2. Kablov E.N. Materials for «Buran» spaceship – innovative solutions of formation of the sixth technological mode. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. S1, pp. 3–9.
3. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 15–29. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
4. Kaplanskii Yu.Yu., Mazalov P.B. World trends in the development of refractory high-entropy alloys for heat-loaded units of aerospace technics (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 30–42. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 17, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.

5. Sevalnev G.S., Korobova E.N., Dvoreckov R.M. et al. Influence of the degree of martensitic structure dispersion and size of carbide phase on the frictional interaction under conditions of dry sliding friction of high-carbon complex alloy steel. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), pp. 15–26. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.
6. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), pp. 3–14. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
7. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, pp. 515–534.
8. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J. et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6 (5), pp. 299–303.
9. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 448–511.
10. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, 1983, vol. 21, pp. 541–547.
11. Armstrong R.W., Walley S.M. High strain rate properties of metals and alloys. *International Materials Reviews*, 2008, vol. 53 (3), pp. 105–128.
12. Voyiadjis G.Z., Abed F.H. Microstructural based models for bcc and FCC metals with temperature and strain rate dependency. *Mechanics of Materials*, 2005, vol. 37, pp. 355–378.
13. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, pp. 427–556.
14. Khan A.S., Huang S. *Continuum theory of plasticity*. John Wiley & Sons, 1995, 420 p.
15. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society B*, 1949, vol. 62 (11), pp. 676–700.
16. Lin Y.C., Chen X.M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working. *Materials & Design*, 2011, vol. 32, pp. 1733–1759.
17. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D. et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*, 2014, vol. 345 (6201), pp. 1153–1158.
18. Otto F., Dlouhý A., Somsen C. et al. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 5743–5755.
19. McQueen H.J., Ryan N.D. Constitutive analysis in hot working. *Materials Science and Engineering A*, 2002, vol. 322, pp. 43–63.

#### Информация об авторах

**Власов Иван Игоревич**, инженер 2 категории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Севальнев Герман Сергеевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Дьяченко Ольга Александровна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Валухова Ирина Владимировна**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Ivan I. Vlasov**, Second Category Engineer, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**German S. Sevalnev**, Head of Laboratory, Candidate of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Olga A. Dyachenko**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Irina V. Valuhova**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 28.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.02.2026.

The article was submitted 28.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.02.2026.