

DOI 10.5862/JEST.238.12

УДК 669.018.44:621.73

К.А. Охапкин, А.С. Кудрявцев, Д.А. Груздев, Г.К. Рерих

АНАЛИЗ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СХЕМЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОКОВОК ИЗ СПЛАВА МАРКИ ХН55МВЦ-ИД

К.А. Okhapkin, A.S. Kudryavtsev, D.A. Gruzdev, G.K. Rerikh

ANALYSIS OF THE PHYSICO-MATHEMATICAL MODEL AND DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS ACCORDING TO THE SCHEME OF DEFORMATION OF LARGE-SIZED FORGING FROM GRADE ХН55МВЦ-ИД ALLOY

В работе представлены результаты физико-математического моделирования с использованием метода конечных элементов технологического процессаковки сплава марки ХН55МВЦ-ИД. В расчете использованы экспериментальные данные о механических характеристиках сплава, определенные при испытаниях на растяжение и сжатие в условиях, имитирующих процессковки. На основе анализа модели сопоставлены процессы осадки и протяжки. Установлено, что в процессе осадки значения растягивающих деформаций в отдельных локальных областях близки к предельной пластичности сплава при температурах 1100–1140 °С. Поэтому для снижения риска образования дефектов в процессе деформации при температурах близких к 1140 °С целесообразно избегать операции осадки слитка. Процесс протяжки при температуре 1140 °С более благоприятен, так как значения растягивающих деформаций много меньше предельной пластичности сплава во всем исследованном диапазоне температур.

НИКЕЛЕВЫЙ СПЛАВ; ПРОЦЕСС КОВКИ; ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ; РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНОЛОГИИ.

The paper presents the results of physical and mathematical modeling of the technological process of forging the grade ХН55МВЦ-ID alloy using the finite element method. In the calculation we used the experimental data on the mechanical properties of the alloy, determined when tested in tension and compression under conditions that simulate the forging process. Based on the analysis of the model the processes of upset forging and stretching are compared. It is found that in the upset forging process, the values of tensile deformations in some local areas are close to the limit of ductility of the alloy at temperatures of 1100 to 1140 °C. Therefore, to reduce the risk of formation of defects in the deformation process at temperatures close to 1140 °C, it is advisable to avoid the operation of upsetting the ingot. Stretching at a temperature of 1140 °C is more favorable, since the values of tensile deformations are much smaller than the limiting plasticity of the alloy in the whole temperature range investigated.

NICKEL ALLOY; FORGING PROCESS; PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL; FINITE ELEMENT METHOD; RECOMMENDATIONS ON TECHNOLOGY.

Введение

Во ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработан сплав марки ХН55МВЦ [1, 2]. Сплав предназначен для длительной высокотемпературной

эксплуатации в контакте с газовым теплоносителем.

В процессе промышленного освоения крупногабаритных полуфабрикатов были обнаружены трещины в передельной заготовке. В работах [3, 4]

определены причины образования дефектов и для повышения технологичности сплава марки ХН55МВЦ-ИД рекомендованы проведение гомогенизационного отжига и снижение температуры горячего передела. В связи с высокой ответственностью конструкции, для которой предполагается использовать материал, даже микроразмерные несплошности недопустимы [5]. Поэтому необходимо рассмотреть случай локального повышения температурыковки (вследствие нагрева при пластической деформации) в области слитка, где неоднородность не растворилась на этапе отжига.

Цель ниших исследований – разработка рекомендаций по снижению вероятности образования микротрещин в случае локального исчерпания деформационной способности металла при пластической обработке.

Материалы и методика исследований

Определение механических свойств сплава проводили по стандартным методикам [6]. Исследования механических свойств сплава ХН55МВЦ-ИД в условияхковки проведены на металле пробы квадратного сечения 90 мм, кованной на прессе.

Приведем химический состав, масс. %, сплава марки ХН55МВЦ-ИД после двойного передела (ВИ+ВДП):

C	0,02	W	2,53
Mn	1,48	V	0,02
Si	0,28	Ti	0,03
S	0,002	N ₂	0,009
P	0,007	Al	0,11
Cr	18,89	Nb	0,03
Ni	53,24	Zr	0,13
Cu	0,03	Co	0,04
Mo	6,10		

Примечание: в сплав введены бор, иттрий и магний по расчету (мас. %): бор – 0,005, иттрий – 0,05, магний – 0,05.

Определение механических свойств при температурах 900–1140 °С проводилось при испытаниях на растяжение до разрушения цилиндрических образцов на установке Zwick Z-050 и на сжатие на закалочно-деформационном дилатометре DIL 805. Параметры нагрева и охлаждения при испытаниях имитировали условия нагрева при ковке: скорость нагрева до 800 °С – по мощности печи, от 800 до 1140 °С – 1,5–5 °С/мин; время выдержки при 1140 °С – 20/60 мин.; охлаждение с температуры 1140 °С до температуры испытаний в печи – ~22 °С/мин; время выдержки при температуре испытаний – 5–10 мин. После испытаний охлаждение до температуры 600 °С с печью, после – на воздухе. Диаметр рабочей части образца на растяжение – 6 мм. Длина рабочей части образца на растяжение – 30 мм. Размер образца на сжатие – Ø5×10 мм.

Построение физико-математической модели было выполнено в программном комплексе DEFORM; расчет параметров деформации проведен на основе конечно-элементного моделирования процесса осадки цилиндрической заготовки высотой 1470 мм и диаметром 465 мм при скорости движения верхнего бойка 180 мм/мин с последующей протяжкой.

Экспериментальные данные и анализ полученных результатов

Результаты испытаний образцов на сжатие в диапазоне температурковки с учетом предполагаемых скоростей деформирования представлены на рис. 1.

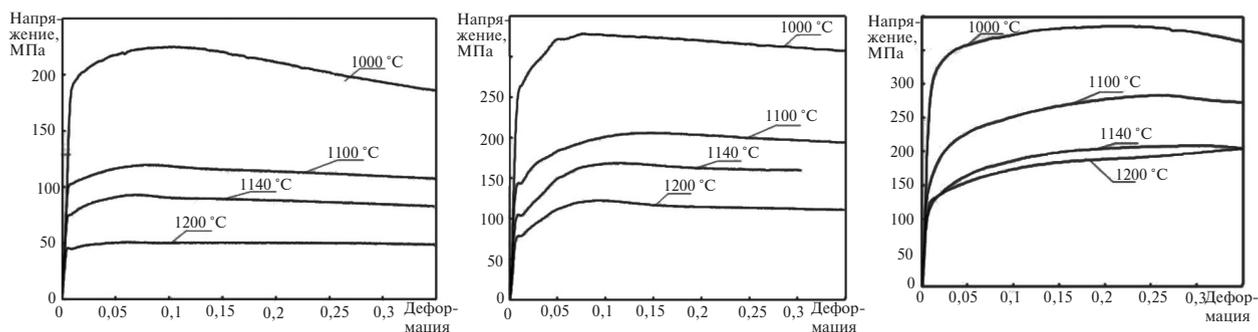


Рис. 1. Зависимости напряжений от деформаций сплава при сжатии. Скорости деформации: а) $0,01\text{c}^{-1}$; б) $0,1\text{c}^{-1}$; в) 1c^{-1}

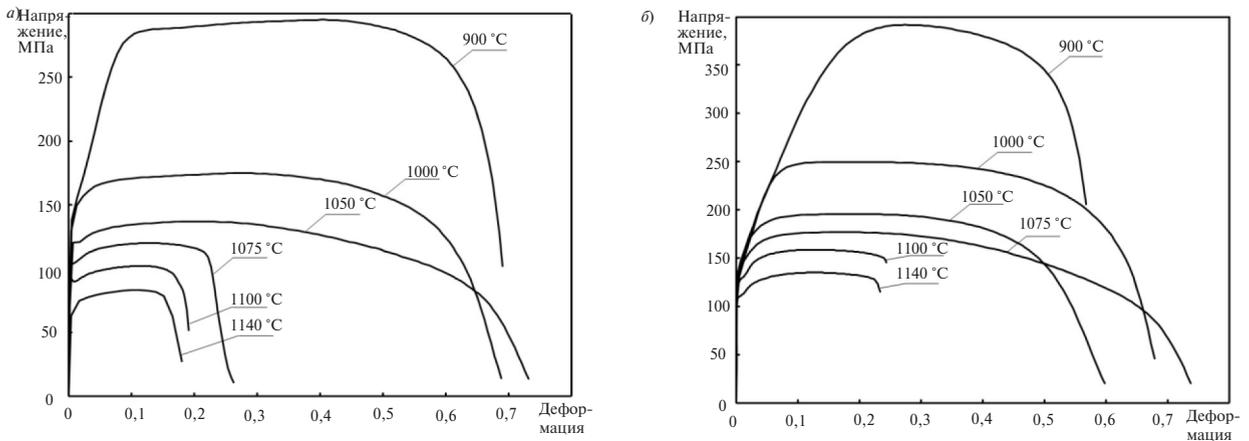


Рис. 2. Зависимости напряжений от деформаций сплава при растяжении.
Скорости деформации: а) – $0,01 \text{ c}^{-1}$; б) – $0,1 \text{ c}^{-1}$

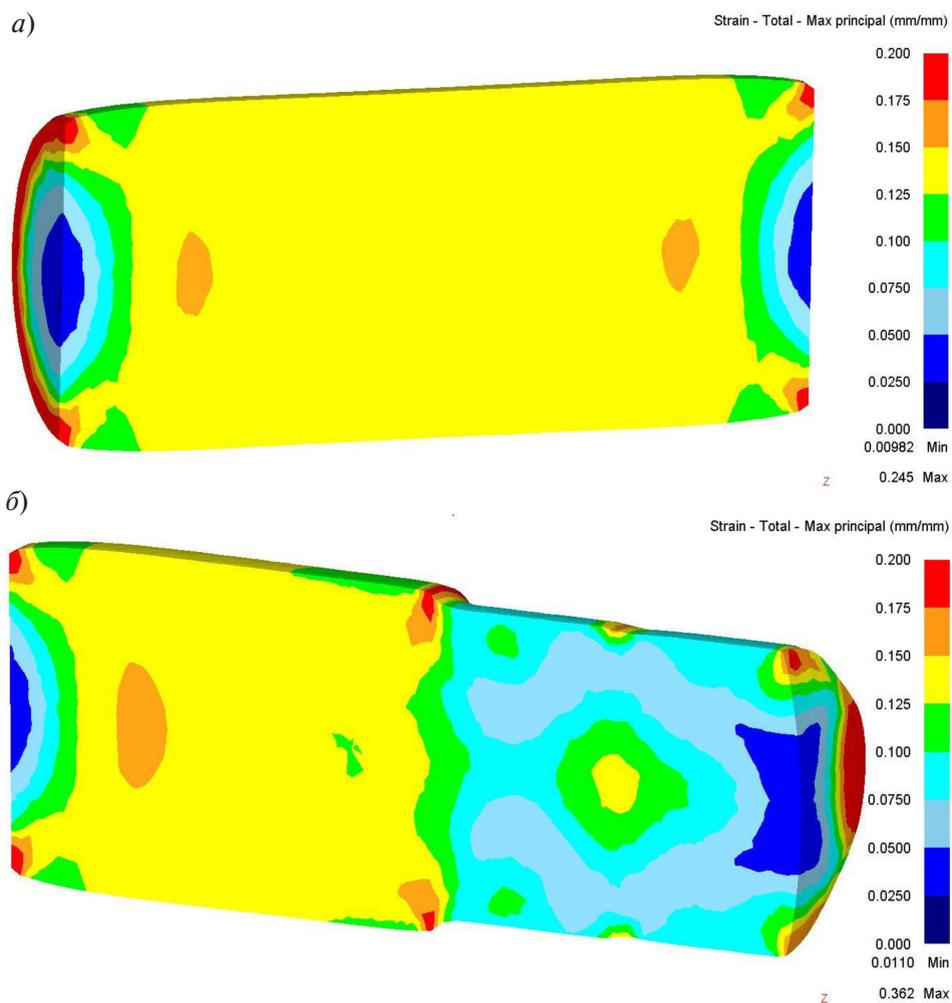


Рис. 3. Результаты расчета. Поле растягивающих деформаций в сечении заготовки в процессах осадки (а) и протяжки (б)

Кроме испытаний на сжатие, проведены механические испытания на растяжение в условиях, имитирующих параметры режимаковки, для нахождения кривой «истинные напряжения—деформаций», используемой в расчете.

Результаты испытаний представлены на рис. 2. Пересчет исходных данных (усилие на захватах в функции от перемещения захватов) в зависимость напряжений от деформаций производился без учета образования шейки.

Для моделирования цилиндрической заготовки построена сетка с использованием 66000 тетраэдрических конечных элементов.

Для краевой задачи были использованы следующие граничные и начальные условия:

на верхний боек задавалось усилие прессы 31500000 Н;

начальная температура заготовки — 1140 °С (равномерно распределена по сечению);

коэффициент черноты поверхности заготовки — 0,8;

коэффициент конвективного теплообмена — 20 Вт/(м²°С);

температура окружающей среды — 25 °С;

коэффициент теплообмена с инструментом — 5 000 Вт/(м²°С);

коэффициент трения с инструментом — 0,7.

Результаты решения задачи представлены на рис. 3. В первом случае выполнено моделирование начальной операции — осадки слитка (рис. 3, а). В поле растягивающих деформаций преобладают значения в диапазоне от 0,125 до 0,175. Во втором случае, в свою очередь, представлены результаты моделирования следующего процесса — протяжки заготовки. В этом случае преобладают значения растягивающих деформаций от 0,05 до 0,1 (см. рис. 3, б).

Сопоставляя полученные значения с результатами механических испытаний на растяжение (см. рис. 2), можно заключить, что предельная пластичность сплава при температурах 1100—1140 °С в отдельных локальных областях близка к значениям растягивающих деформаций заготовки при осадке. Для подтверждения корректности такого сравнения был проведен расчет скоростей истинной деформации в сечении заготовки в процессе осадки (рис. 4). Расчет показал, что скорость деформации лежит в диапазоне 0,01—0,289 с⁻¹; в основном в поле скоростей преобладают значения близкие к 0,1 с⁻¹. Эти зна-

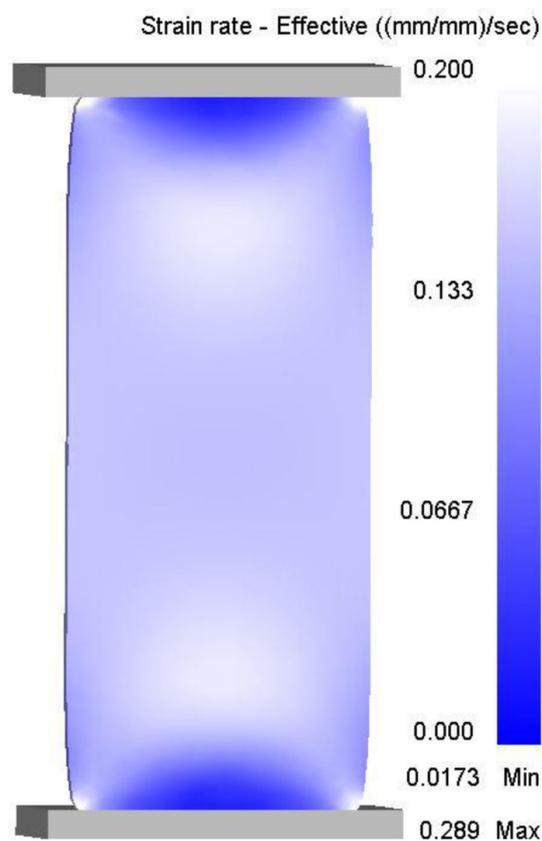


Рис. 4. Поле скоростей истинной деформации в сечении заготовки в процессе осадки по результатам расчета

чения согласуются с параметрами пластической деформации сплавов с аустенитной структурой [7–11]. При такой скорости рассчитанные растягивающие деформации достигают уровня 0,2, который близок к значению предельной пластичности при механических испытаниях на растяжение. Вследствие этого существует вероятность разрушения заготовки в процессе осадки по принятому режиму при температуре 1140 °С. Значительное снижение температуры осадки (до уровня безопасного с точки зрения образования несплошностей) сужает интервал горячей деформации, так как температура окончанияковки определяется предельным усилием ковочного прессы. Процесс протяжки при температуре 1140 °С более благоприятен, поскольку значения растягивающих деформаций много меньше предельной пластичности сплава во всем диапазоне температур. Следовательно, можно рекомендовать при разработке технологического процесса

ковки избегать операции осадки, заменяя ее на протяжку, при условии обеспечения заданных значений укова с учетом высокой сплошности и однородности слитка после двойного (ВИ + ВДП) переуплава [12–17].

Выводы

На основе физико-математического моделирования процессаковки сплава марки ХН55МВЦ-ИД установлено, что в процессе осадки значения

растягивающих деформаций в отдельных локальных областях близки к предельной пластичности сплава при температурах 1100–1140 °С. Поэтому для снижения вероятности образования трещин рекомендуется избегать операции осадки при обеспечении заданных значений укова. Данную рекомендацию целесообразно использовать совместно с рассмотренными в работе [4] снижением температурыковки и проведением гомогенизационного отжига слитка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2543587. Жаропрочный сплав на никелевой основе / Орыщенко А.С., Карзов Г.П., Кудрявцев А.С., Трапезников Ю.М., Артемьева Д.А., Охалкин К.А. // Приоритет 10.03.15.
2. Марков В.Г., Кудрявцев А.С., Охалкин К.А. Создание принципиальной композиции сплава, структурно стабильного в условиях облучения и длительной эксплуатации при температурах 500–800 °С. // Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» 7–10 октября 2014 г. / Москва, ОАО «НИКИЭТ». 2014. С. 239–240.
3. Каштанов А.Д., Петров С.Н., Кудрявцев А.С., Охалкин К.А., Груздев Д.А. Анализ причин образования трещин при горячей пластической деформации сплава марки ХН55МВЦ-ИД // Вопросы материаловедения. 2015. № 4 (84). С. 17–23.
4. Карзов Г.П., Каштанов А.Д., Кудрявцев А.С., Охалкин К.А., Груздев Д.А. Влияние химической неоднородности на «горячие» механические свойства сплава ХН55МВЦ-ИД и повышение технологичности при термомеханическом воздействии // Вопросы материаловедения. 2015. № 4 (84). С. 23–29.
5. Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю. Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. / Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. СПб. 2006. 363 с.
6. Кондратьев С.Ю. Механические свойства металлов: учебное пособие. / М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. СПб, 2011. 128 с.
7. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1976. 488 с.
8. Дзугутов М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1977. 480 с.
9. Бернштейн М.Л., Добаткин С.В., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д. Диаграммы горячей деформации, структура и свойства сталей: Справ. изд. М.: Металлургия, 1989. 544 с.
10. Фрост Г. Дж., Эшби М.Ф. Карты механизмов деформации / Пер. с англ. Л.М. Бернштейна. Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1989. 328 с.
11. Дзугутов М.Я. Напряжение и разрывы при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1974. 280 с.
12. Барахтин Б.К., Лебедева Н.В., Маркова Ю.М., Немец А.М. Колебательные структурные перестройки по данным карт диссипации при горячем сжатии сплава 04Х20Н6Г11М2АФБ // Вопросы материаловедения. 2013. № 1 (73). С. 72–80.
13. Швед Ф.И. Слиток вакуумного дугового переуплава. Челябинск: ООО «Издательство Татьяны Лурье», 2009. 428 с.
14. Бояринов В.А., Шалимов А.Г., Щербаков А.И., Петрман И., Неудлы И. Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме. М.: Металлургия. 1979, 304 с.
15. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы. Нью-Йорк – Лондон – Сидней – Торонто, 1972./ Пер. с англ. М.: Металлургия, 1976. 568 с.
16. Голиков И.Н., Масленков С.Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. М., Металлургия, 1977. 224 с.
17. Сергеев А.Б. Вакуумный дуговой переуплав. М.: Металлургия, 1974.

REFERENCES

1. Patent RF № 2543587. Zharoprochnyy spлав na nikel'evoy osnove. [Heat-resistant Nickel-based alloy] / Oryshchenko A.S., Karzov G.P., Kudryavtsev A.S., Trapeznikov Yu.M., Artemyeva D.A., Okhapkin K.A. Prioritet 10.03.15. (rus)
2. Markov V.G., Kudryavtsev A.S., Okhapkin K.A.

Sozdaniye printsipialnoy kompozitsii splava, strukturno stabilnogo v usloviyakh oblucheniya i dlitelnoy ekspluatatsii pri temperaturakh 500–800 °C. [The establishment of the principle of the composition of the alloy, structurally stable under radiation and long-term operation at temperatures 500–800°C]. *Proceeding of III international scientific and practical conference «Innovative projects and technologies in the nuclear power industry»*. Moscow: NIKIET publ., 2014. S. 239–240. (rus).

3. **Kashtanov A.D., Petrov S.N., Kudryavtsev A.S., Okhapkin K.A., Gruzdev D.A.** Analiz prichin obrazovaniya treshchin pri goryachey plasticheskoy deformatsii splava marki KhN55MVTs-ID [Analysis of the causes of crack formation during hot plastic deformation of the alloy grade XH55MBII-ID]. *The issues of materials*. St.Petersburg: Prometey Publ. 2015. №4(84). S. 17–23. (rus)

4. **Karzov G.P., Kashtanov A.D., Kudryavtsev A.S., Okhapkin K.A., Gruzdev D.A.** Vliyaniye khimicheskoy neodnorodnosti na «goryachiye» mekhanicheskiye svoystva splava KhN55MVTs-ID i povysheniye tekhnologichnosti pri termodeformatsionnom vozdeystvii [The effect of chemical heterogeneity on the hot mechanical properties of the alloy XH55MBII-ID and improving manufacturability while thermal deformation effects]. *The issues of materials*. St.Petersburg: Prometey Publ. 2015. № 4(84). S. 23–29. (rus)

5. **Kolbasnikov N.G., Kondratyev S.Yu.** Struktura. Entropiya. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva metallov. [Structure. Entropy. Phase transformations and properties of metals]. St.Petersburg: SPbGPU Publ., 2006. 363 s. (rus)

6. **Kondratyev S.Yu.** Mekhanicheskiye svoystva metallov: uchebnoye posobiye [Mechanical properties of metals: manual]. St.Petersburg: SPbGPU Publ., 2011, 128 p. (rus)

7. **Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M.** Soprotivleniye plasticheskoy deformatsii metallov i splavov. [The resistance to plastic deformation of metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1976. 488 s. (rus)

8. **Dzugutov M.Ya.** Plasticheskaya deformatsiya vysokolegirovannykh staley i splavov. Izd. 2-ye, pererab. i

dop. [Plastic deformation of high-alloyed steels and alloys. Second edition, revised and augmented]. Moscow: Metallurgy, 1977. 480 s. (rus)

9. **Bernshteyn M.L., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M., Prokoshkin S.D.** Diagrammy goryachey deformatsii, struktura i svoystva staley: Sprav. izd. [The hot deformation diagrams, structure and properties of materials: reference book]. Moscow: Metallurgy, 1989. 544 s. (rus)

10. **Frost G.Dzh., Eshbi M.F.** Karty mekhanizmov deformatsii. Per. s ang. Bernshteyna L.M./[Maps of deformation mechanisms]. Chelyabinsk: Metallurgy, Chelyabinsk department, 1989. 328 s. (rus)

11. **Dzugutov M.Ya.** Napryazheniye i razryvy pri obrabotke metallov davleniyem / [The tension and gaps in the processing of metals by pressure] Moscow: Metallurgy, 1974. 280 s. (rus)

12. **Barakhtin B.K., Lebedeva N.V., Markova Yu.M., Nemets A.M.** Kolebatelnyye strukturnyye perestroyki po dannym kart dissipatsii pri goryachem szhatii splava 04Kh20N6G11M2AFB. [Oscillatory structural adjustment according to maps of dissipation during hot compression of alloy 04Kh20N6G11M2AFB]. *The issues of materials*. St.Petersburg: Prometey Publ., 2013, №1(73). S. 72–80 (rus)

13. **Shved F.I.** Slitok vakuumnogo dugovogo pereplava. [The ingot vacuum-arc remelting] Chelyabinsk: Publishing house Tatiana Lurie, 2009. 428 s. (rus)

14. **Boyarshinov V.A., Shalimov A.G., Shcherbakov A.I., Petrman I., Neyedly I.** Rafiniruyushchiye pereplavy stali i splavov v vakuume. [Refining of steel and alloys in vacuum] Moscow: Metallurgy, 1979. 304 s. (rus)

15. **Sims Ch., Khagel V.** Zharoprochnyye splavy. [Heat-resistant alloys] New-York – London – Sidney – Toronto, 1972. / Transl. from English. Moscow: Metallurgy, 1976. 568 s. (rus)

16. **Sergeyev A.B.** Vakuumnyy dugovoy pereplav. [Vacuum arc remelting]. Moscow: Metallurgy, 1974. (rus)

17. **Golikov I.N., Maslenkov S.B.** Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh. [Dendritic liquation in steels and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1977. 224 s. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ОХАПКИН Кирилл Алексеевич – кандидат технических наук старший научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей».

191015, Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.

E-mail: kirill.okhapkin@mail.ru

ОКХАПКИН Kirill A. – Federal state unitary enterprise central research institute of structural materials “Prometey”.

Russia, 191015, Saint Petersburg, Shpalernaya St., 49.

E-mail: kirill.okhapkin@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ Алексей Сергеевич – кандидат технических наук начальник сектора Федерального государственного унитарного предприятия Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей».

191015, Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.

E-mail: kudryavtsev@yandex.ru

KUDRYAVTSEV Aleksei S. – Federal state unitary enterprise central research institute of structural materials “Prometey”.

Russia, 191015, Saint Petersburg, Shpalernaya St., 49.

E-mail: kudryavtsev@yandex.ru

ГРУЗДЕВ Дмитрий Алексеевич – ведущий инженер-программист Федерального государственного унитарного предприятия Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей».

191015, Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., д. 49.

E-mail: mgruzd@bk.ru

GRUZDEV Dmitrii A. – Federal state unitary enterprise central research institute of structural materials “Prometey”.

Russia, 191015, Saint Petersburg, Shpalernaya St., 49.

E-mail: mgruzd@bk.ru

РЕРИХ Герман Константинович – старший инженер ООО «ЦКТИ-Вибросейсм».

195220 г. Санкт-Петербург, улица Гжатская дом 9.

E-mail: ger.rerih@yandex.ru

RERIKH German K. – CKTI-VIBROSEISM LTD.

9, Gzhatskaya Str. St. Petersburg 195220 Russia.

E-mail: ger.rerih@yandex.ru