

УДК 669.255'26'28' :539.4.015.1

АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА Co-28Cr-6Mo В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ¹

©2023 г. Ю.В. Гамин^{1*}, Т.Ю. Кин^{1*}, С.П. Галкин^{1*},
А. Махмуд Альхадж Али^{1*}, М.М. Карашаев^{1*}, А.Г. Падалко^{2*}

^{1*}Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (НИТУ
МИСИС), Москва

E-mail: y.gamin@mail.ru

^{2*}ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской
академии наук (ИМЕТ РАН), Москва

Поступила в редакцию 3 июля 2023 г.

После доработки 18 августа 2023 г. принята к публикации 29 августа 2023 г.

Проведен анализ деформационного поведения и эволюции микроструктуры сплава Co-28Cr-6Mo в процессе испытаний на одноосное сжатие. Испытания проводились при температурах 1000, 1100 и 1200 °С и скоростях деформации 1, 10 и 50 с⁻¹ на установке Gleeble 3800. Получены кривые сопротивления деформации и определены значения пиковых напряжений. Деформационное поведение сплава характеризуется возрастанием напряжения течения с увеличением скорости деформации и его снижением при повышении температуры. Пиковое напряжение зафиксировано при более высоких степенях деформации при понижении температуры и увеличении скорости деформации. Деформация в диапазоне температур 1000—1100 °С сопровождается процессами деформационного упрочнения и частичной динамической рекристаллизации. После деформации при 1200 °С микроструктура образцов представляет собой равноосные рекристаллизованные зерна, а микротвердость не зависит от скорости деформации. В то же время повышение скорости деформации при температурах 1000—1100 °С приводит к незначительному снижению микротвердости. Полученные данные могут быть использованы при выборе режимов деформации сплава Co-28Cr-6Mo с использованием промышленных способов обработки давлением.

Ключевые слова: сплавы системы Co-Cr-Mo; эволюция микроструктуры; динамическая рекристаллизация; двойники деформации; режим деформации.

Сплавы системы Co-Cr-Mo используются в медицине в качестве материала для изготовления хирургического инструмента и составных элементов имплантов тазобедренного сустава [1, 2]. Повышенный интерес к данным сплавам обусловлен их высокими механическими свойствами, стойкостью к коррозии и износу. Преимущественно сплавы системы Co-Cr-Mo используют в виде литых заготовок, что в значительной степени является причиной их ограниченных пластических свойств и способствуют сокращению срока эксплуатации изготавливаемых изделий из-за преждевременного износа. Добиться существенного повышения механических

свойств данных сплавов, в частности пластических, удается различными методами обработки давлением. Однако из-за особенностей фазовых и структурных превращений в процессе пластической деформации важность приобретает задача выбора режимов деформации. Процессы изменения микроструктуры, происходящие во время горячей пластической деформации (деформационное упрочнение, полигонизация или динамическая рекристаллизация (ДР)), оказывают существенное влияние на конечные механические свойства продукции и ее качество [3]. В зависимости от деформационных и температурно-скоростных условий возможно получение не только разного уровня механических свойств, но и осуществление деформации без образования дефектов [4]. К основным способам исследования микроструктурных

¹Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00477, <https://rscf.ru/project/23-19-00477/>.

трансформаций в процессе пластической деформации относятся испытания на сжатие, растяжение или кручение образцов при заданных температурно-скоростных параметрах [5—7]. Так, в работе [8] исследовалось влияние параметров термомеханической обработки (ТМО), в частности горячей деформации при сжатии, на микроструктуру и свойства сплава на основе системы Co-Cr-Mo. Показано, что начало динамической рекристаллизации и выделения различных фаз определяется как функция от температуры, а пластичность и прочность сплава по данным [9] во многом зависят от полученного размера зерна. При этом на формирование структуры и свойств значительно влияет наличие или отсутствие фазового перехода $\gamma \rightarrow \epsilon$.

По результатам многочисленных экспериментов [10, 11] на процессы динамической рекристаллизации влияют не только условия ТМО, но и начальный размер зерна, частицы вторичных фаз, энергия дефектов упаковки и др. Таким образом, несмотря на ряд проведенных исследований, влияние пластической деформации и процессов, протекающих во время нее, на свойства сплавов на основе системы Co-Cr-Mo остается неочевидным. По этой причине выявление зависимостей структурообразования и формирования свойств в процессах обработки давлением представляется перспективным направлением исследований.

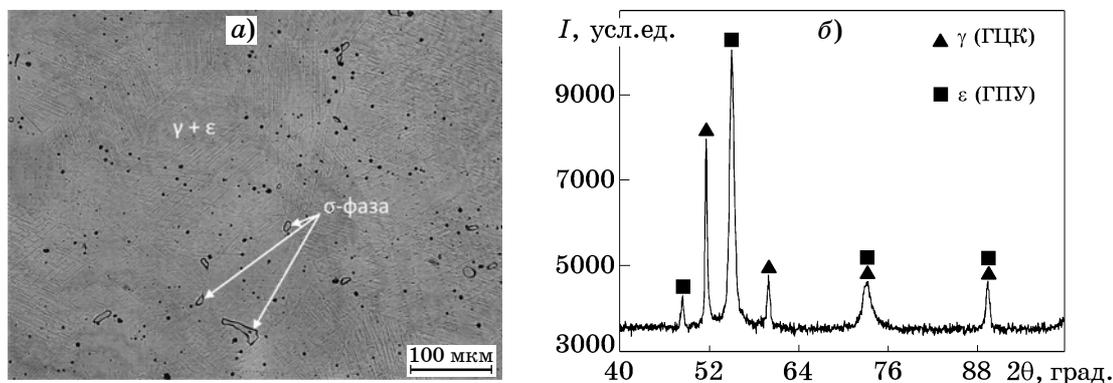
Данная работа проводилась с целью определения зависимости формирования микроструктуры сплава Co-28Cr-6Mo от температуры и скорости деформации при горячей деформации сжатием для последующего выбора оптимальных технологических параметров режима деформации.

Материалы и методы исследования. Экспериментальный сплав имел следующий состав, мас. %: Co — основа; Cr 28; Mo 6; Ni 0,7; Fe 0,5; Si 0,3; C 0,013; S 0,004.

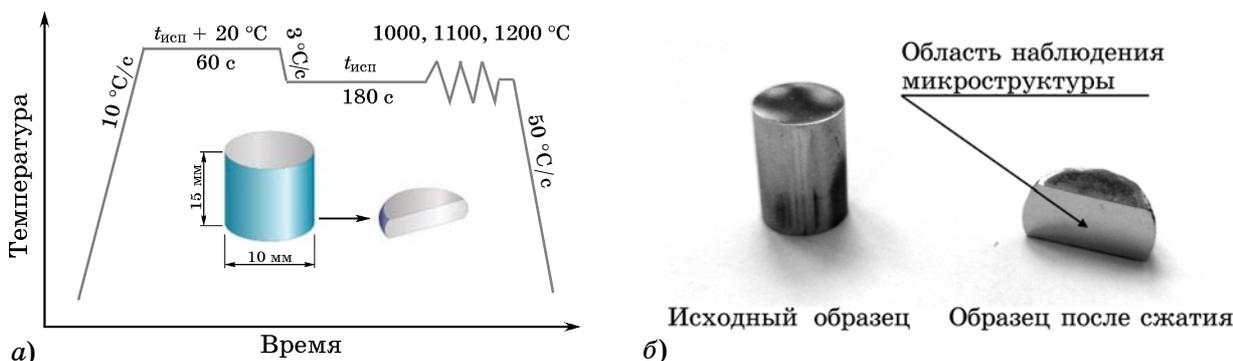
Исходный слиток данного сплава диаметром 55 мм получен в вакуумно-индукционной печи. Далее для обеспечения равномерной микроструктуры перед процессом испытаний на сжатие проводили отжиг слитка при температуре 1230 °C в течение 6 ч с последующей закалкой в воде. Как показано на фиг. 1, а, микроструктура исходной заготовки после отжига представляет собой равноосные зерна со средним размером 150—200 мкм. Рентгеноструктурный анализ (XRD) сплава показал (фиг. 1, б), что структура состоит из смеси аустенитной γ -фазы (ГЦК) и мартенситной ϵ -фазы (ГПУ). На рентгенограмме не выявлено пиков, соответствующих интерметаллидной σ -фазе, по причине малого ее количества, однако на оптических снимках видны локальные незначительные частицы данной фазы, расположенные по границам зерен.

Из слитка были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 10 и высотой 15 мм. Испытания на сжатие проводили на установке Gleeble 3800 в вакууме при температурах 1000, 1100 и 1200 °C и скоростях деформации 1, 10 и 50 с⁻¹. После завершения деформации в образцах их охлаждали с высокой скоростью для фиксации микроструктуры. Основные условия проведения эксперимента отражены на диаграмме, приведенной на фиг. 2, а. По результатам испытаний получены кривые сопротивления деформации сплава.

Исследование микроструктуры проведено с помощью оптического микроскопа в центре



Фиг. 1. Исходная микроструктура образца сплава Co-28Cr-6Mo после гомогенизации (а) и рентгенограмма его образца (б)



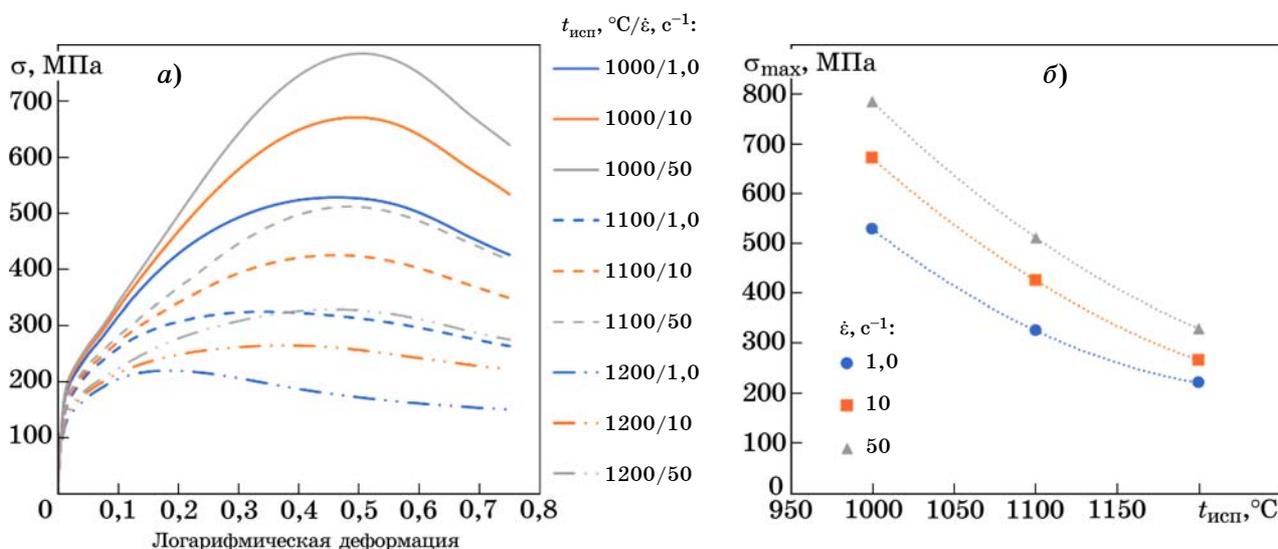
Фиг. 2. Диаграмма термомеханических испытаний (а) и внешний вид образцов сплава Co-28Cr-6Mo (б)

образца в продольном его сечении (фиг. 2, б). Предварительно поверхность образцов, предназначенных для исследования, шлифовали и полировали с помощью абразивной бумаги разной зернистости, далее подвергали электролитическому травлению при рабочем напряжении 6 В в растворе H_2SO_4 и метанола (9:1).

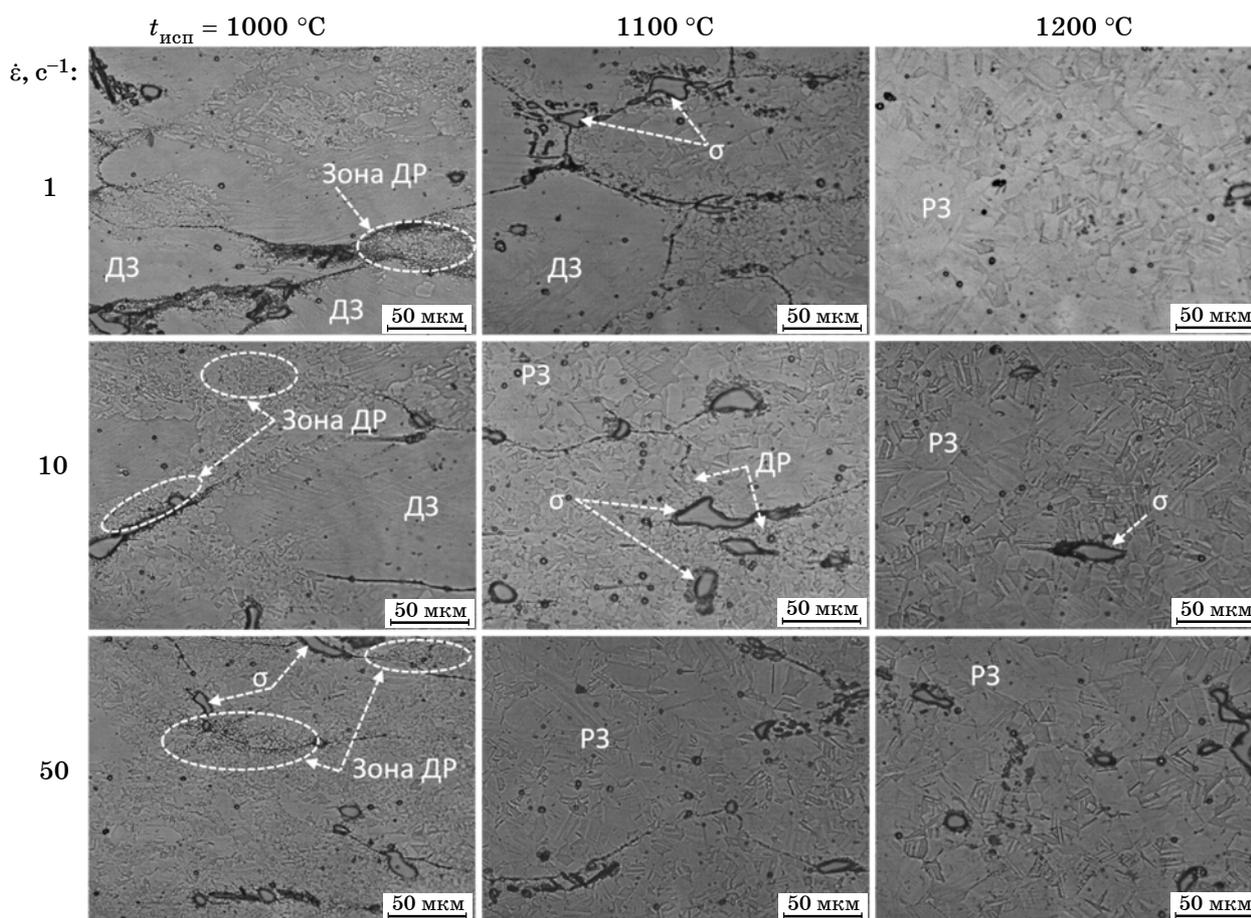
Микротвердость измеряли на универсальном твердомере DUROLINE MH-6 (длительность выдержки 5 с, нагрузка 10Н (1 кгс)) по методу Виккерса в указанной на фиг. 2, б области наблюдения микроструктуры минимум пять раз для каждого образца.

Результаты исследования и их обсуждение. На фиг. 3, а показаны кривые сопротивления деформации сплава Co-28Cr-6Mo при испытании образцов на сжатие, на фиг. 3, б приведены значения пиковых напряжений при разных температурах и скоростях деформации.

Полученные результаты показали, что сопротивление деформации достигает максимального пикового напряжения (~800 МПа) при температуре 1000 °C и скорости деформации 50 c^{-1} , а минимальное значение (~210 МПа) зафиксировано при 1200 °C и скорости деформации 1 c^{-1} (фиг. 3. а). Деформационное поведение сплава характеризуется возрастанием напряжения течения с увеличением скорости деформации и его снижением при повышении температуры испытания. Для всех вариантов температурно-скоростных условий испытаний на начальном этапе деформации отмечаются резкий рост напряжения до достижения пикового значения, а затем снижение напряжения с разной степенью интенсивности. При этом пиковое напряжение наблюдается при более высоких степенях деформации с понижением температуры и увеличением скорости деформации. Резкое снижение напряжения течения



Фиг. 3. Сопротивление деформации сплава Co-28Cr-6Mo при разных температурах $t_{исп}$ и скоростях $\dot{\epsilon}$ деформации (а) и пиковое напряжение (б)



Фиг. 4. Микроструктура образцов сплава Co-28Cr-6Mo при разных температурах и скоростях деформации (ДР — динамическая рекристаллизация; ДЗ — деформированные зерна; РЗ — рекристаллизованные зерна)

может быть следствием интенсивного развития процесса рекристаллизации, в то время как незначительное снижение или неизменное напряжение течения при увеличении степени деформации может говорить о процессах возврата.

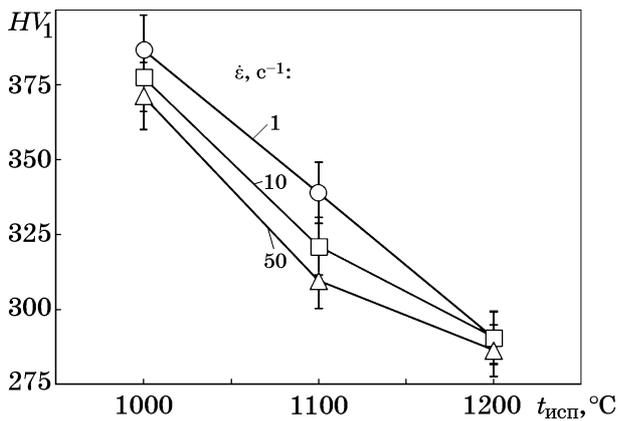
Стоит отметить, что характер изменения пикового напряжения σ_{\max} в зависимости от температуры (фиг. 3, б) одинаков при всех трех скоростях деформации, а именно наблюдается снижение значений с повышением температуры испытания. Это, в свою очередь, указывает на возможность деформации сплава при повышенных температурах с целью получения необходимой пластичности за счет снижения сопротивления деформации.

На фиг. 4 видно, как изменяется микроструктура сплава Co-28Cr-6Mo в зависимости от температуры и скорости деформации в процессе испытаний на сжатие.

При температуре 1000 °C начало динамической рекристаллизации выражено наиболее ярко. В образцах, полученных при ма-

лых скоростях деформации (1 с^{-1}), наблюдаются преимущественно деформированные крупные исходные зерна и небольшое количество мелких зародышей динамически рекристаллизованных зерен, расположенных вблизи границ и в областях интерметаллидной σ -фазы. С увеличением скорости деформации количество динамически рекристаллизованных зерен возрастает, однако сохраняется неравномерная структура с наличием областей с остаточными исходными зернами. Тенденция к увеличению доли рекристаллизованного зерна с увеличением скорости деформации наблюдалась также при повышении температуры деформации до 1100 и 1200 °C, кроме этого отмечено увеличение размера рекристаллизованных зерен.

Изменение микроструктуры при температуре 1100 °C в диапазоне исследуемых скоростей деформации характеризуется образованием динамически рекристаллизованных зерен при скорости деформации 1 с^{-1} , но в значительно большей степени, чем при



Фиг. 5. Микротвердость образцов сплава Co-28Cr-6Mo после горячей деформации сжатием

1000 °C. С увеличением скорости деформации количество исходных деформированных крупных зерен сокращается, но при этом не устраняется полностью, что указывает на незавершившийся процесс динамической рекристаллизации. Также различимы исходные границы зерен и неполное растворение интерметаллидной фазы в их близости, что может оказывать влияние на технологическую пластичность сплава.

При температуре деформации 1200 °C и преимущественно при скоростях деформации 10 и 50 с⁻¹ микроструктура образцов сплава представляет собой равномерную структуру с равноосными зернами со средним размером 45–50 мкм и с большим количеством двойников отжига, что указывает на процесс постдинамической и статической рекристаллизации. При скорости деформации 1 с⁻¹ отмечается некоторая неравномерность микроструктуры, выраженная наличием крупных зерен в мелкозернистой области. При этом следует отметить снижение количества интерметаллидной фазы для 1200 °C в сравнении с другими температурами деформации. В данном случае температура нагрева образцов (1200+20 °C) и суммарная длительность выдержки (240 с) способствуют частичному растворению интерметаллидной σ -фазы.

Увеличение скорости и повышение температуры деформации приводят к увеличению доли рекристаллизованной микроструктуры в сплаве, что наглядно демонстрируют снимки микроструктуры на фиг. 4.

Результаты измерений микротвердости образцов после испытаний на сжатие (фиг. 5) показали снижение значений HV_1 при повышении температуры испытаний независимо

от скорости деформации, что согласуется с данными проведенного анализа микроструктуры сплава. Повышение температуры деформации оказывает влияние на сопротивление деформации сплава, приводя к интенсификации разупрочнения и более раннему началу этих процессов.

Выводы. 1. Деформационное поведение сплава Co-28Cr-6Mo, подвергнутого горячей деформации при разных температурно-скоростных режимах, характеризуется возрастанием напряжения течения с увеличением скорости деформации и его снижением при повышении температуры. С понижением температуры и увеличением скорости деформации пиковое напряжение наблюдается при более высоких степенях деформации, что указывает на преобладание процесса деформационного упрочнения на начальном этапе деформирования.

2. При температуре 1000 °C преобладающими механизмами эволюции микроструктуры являются деформационное упрочнение и неполная динамическая рекристаллизация. При 1200 °C происходит формирование равноосной рекристаллизованной зеренной структуры, а также уменьшение доли интерметаллидной σ -фазы.

3. Зародыши динамически рекристаллизованных зерен формируются на границах зерен и в областях интерметаллидной σ -фазы.

4. Увеличение скорости и повышение температуры деформации приводят к увеличению относительной доли и размера рекристаллизованных зерен.

5. Микротвердость сплава практически не зависит от скорости деформации при 1200 °C. Увеличение скорости деформации при температурах 1000–1100 °C приводит к незначительному снижению микротвердости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Niinomi, M. Development of new metallic alloys for biomedical applications / Niinomi M., Nakai M., Hieda J. // *Acta Biomaterialia*. 2012. V.8. №7. P.3888–3903.
2. Ibrahim, M.Z. Biomedical materials and techniques to improve the tribological, mechanical and biomedical properties of orthopedic implants : A review article / Ibrahim M.Z., Sarhan A.A.D., Yusuf F., Hamdi M. // *J. Alloys and Comp.* 2017. V.714. P.636–667.
3. Yamashita, Y. Dynamic recrystallization behavior of biomedical CCM alloy with additions of C and N / Yamashita Y., Li Y., Onodera E., Matsumoto H., Chiba A. // *Mater. Trans.* 2010. V.51. Is.9. P.1633–1639.
4. Guo, S. An investigation on the hot deformation behavior and processing maps of Co-Ni-Cr-W-based

- superalloy / Guo S., Wu S., Guo J., Shen Y., Zhang W. // *J. Manufact. Proc.* 2022. V.74. P.100—111.
5. Chiba, A. Construction of processing map for biomedical Co-28Cr-6Mo-0,16N alloy by studying its hot deformation behavior using compression tests / Chiba A., Lee S-H., Matsumoto H., Nakamura M. // *Mater. Sci. Eng. A.* 2009. V.513, 514. P.286—293.
 6. Gamin, Y.V. Development of temperature-rate modes of hot deformation of the Co-28Cr-6Mo alloy based on processing maps / Y.V. Gamin, A.V. Korotitskiy, T.Y. Kin, S.P. Galkin, S.A. Kostin, E.O. Tikhomirov // *Steel Transl.* 2022. V.52. №11. P.1027—1036.
 7. Dovzhenko, N.N. Deformation behavior during hot processing of the alloy of the Al-Mg system economically doped with scandium / N.N. Dovzhenko, S.V. Rushchits, I.N. Dovzhenko, S.B. Sidelnikov, D.S. Voroshilov, A.I. Demchenko, V.N. Baranov, A.I. Bezrukikh, P.O. Yuryev // *Intern. J. Adv. Manufact.* 2021. V.115. P.2571—2579.
 8. Hassani, F.Z. Hot compression deformation characteristics and microstructural evolution of a Co-Cr-Mo-C alloy : Effect of precipitate and martensitic transformation / F.Z. Hassani, M. Ketabchi, G.R. Ebrahimi, S. Bruschi // *Mater. Sci. Eng. A.* 2016. V.657. P.383—392.
 9. Huang, P. Athermal ϵ -martensite in a Co-Cr-Mo alloy : grain size effects / P. Huang, H.F. López // *Mater. Lett.* 1999. V.39. P.249—253.
 10. Li, Y. Dynamic recrystallization in biomedical Co-29Cr-6Mo-0,16N alloy with low stacking fault energy / Li Y., Koizumi Y., Chiba A. // *Mater. Sci. Eng. A.* 2016. V.668. P.86—96.
 11. Huang, K. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials / K. Huang, R.E. Logé // *Mater. Design.* 2016. V.111. P.548—574.
 12. Гамин, Ю.В. Анализ микроструктуры, фазового состава и свойств сплава Co-29Cr-6Mo в литом и отожженном состоянии / Ю.В. Гамин, Т.Ю. Кин, Е.О. Тихомиров // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов. Сб. тезисов. Научно-технический семинар. — М. : [б.и.]. 2022. С.120.