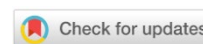


ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.762: 621.7 016.2

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-230-241>

Влияние способа получения и структуры хромоникелевых коррозионностойких сталей на кинетику формирования наружной обоймы сферических шарниров

Н.А. Конько^{ID}✉, Б.Г. Гасанов^{ID}Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация✉ konko2013@mail.ru

EDN: OHKNMX

Аннотация

Введение. Исследуя вопросы износостойкости шарниров, авторы представленной работы ранее выяснили, как особенности хромоникелевых коррозионно-стойких сталей влияют на формирование наружной обоймы сферических шарниров. Прессовки из 12X18H10T, ВП 304.200.30 и 304L-AW-100 спекали 3 ч в вакууме при 1200 °С. Однако практика требует испытаний разных сталей при разных условиях. В данной статье описана катаная нержавеющая сталь 10X18H9. Порошковую ВП 304.200.30 спекали 2 ч при 1150 °С. Цель работы — показать, как способ получения и структура металла определяют кинетику формирования наружной обоймы сферических шарниров и в итоге — прочность изделия.

Материалы и методы. Образцы из 10X18H9¹ и ВП 304.200.30 радиально сжимали по ГОСТ 26529–85², растягивали³ на испытательной машине УММ-5⁴. Твердость измеряли на приборе Роквелла ТР 5006⁵, микротвердость — по Виккерсу на приборе HVS-1000⁶. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре XRD-6100. Использовали микроскопы *Tescan VEGA II LMU* (для электронно-зондовых исследований), *Quanta 200* и *Altami MET-1M* (для изучения микроструктуры и металлографии). Холодную штамповку наружной обоймы с фланцем сферического шарнира моделировали в *QForm*.

Результаты исследования. Предел прочности и текучести ВП 304.200.30 соизмерим с показателями некоторых хромоникелевых аустенитных сталей, но уступает им по пластичности. Сопоставление 10X18H9 и ВП 304.200.30 выявило различия в механизмах деформации. Критическое ограничение для порошковой стали — не оксидная фаза, а локализация оксидов на границах частиц, что провоцирует хрупкое разрушение при растяжении. Из-за химической неоднородности частиц и остаточной пористости относительное удлинение порошковой стали в 6 раз меньше, чем катаной. Но в условиях сжатия спеченный материал упрочняется до 195 HV, то есть подходит для производства наружной обоймы сферических шарниров.

¹ ГОСТ 5632–2014. *Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113778> (дата обращения: 21.06.2025).

² ГОСТ 26529–85. *Материалы порошковые. Метод испытания на радиальное сжатие*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011117> (дата обращения: 21.06.2025).

³ ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (дата обращения: 21.06.2025).

⁴ ГОСТ 28840–90. *Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023577> (дата обращения: 21.06.2025).

⁵ ГОСТ 9013–59. *Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004663> (дата обращения: 21.06.2025).

⁶ ГОСТ 9450–76. *Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012869> (дата обращения: 21.06.2025).

Обсуждение. Анализ особенностей деформаций печенных и катаных сталей подтвердил адекватность предложенной методики оценки деформированного состояния образцов при холодной штамповке наружной обоймы сферических шарниров.

Заклучение. Результаты исследования позволяют прогнозировать очаги зарождения макродефектов и оптимизировать производство сферических шарниров.

Ключевые слова: катаная сталь 10X18N9, порошковая сталь ВП 304.200.30, наружная обойма сферического шарнира, микротрещины хромоникелевой стали

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Конько Н.А., Гасанов Б.Г. Влияние способа получения и структуры хромоникелевых коррозионностойких сталей на кинетику формирования наружной обоймы сферических шарниров. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):230–241. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-230-241>

Original Empirical Research

Influence of the Production Method and the Structure of Chromium-Nickel Corrosion Resistant Steels on the Kinetics of the Formation of the Outer Cage of Spherical Joints

Nikolai A. Konko , Badrudin G. Gasanov 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

✉ konko2013@mail.ru

Abstract

Introduction. Investigating the issues of wear resistance of joints, the authors of this paper have previously studied how the features of chromium-nickel corrosion resistant steels affect the shaping of the outer cage of spherical hinges. They sintered compacts made of 12Kh18N10T, VP 304.200.30 and 304L-AW-100 at 1,200°C in vacuum for 3 hours. However, in practice, it is necessary to test different steels in different conditions. This paper describes 10Kh18N9 rolled stainless steel. Powder VP 304.200.30 was sintered at 1,150°C for 2 hours. The aim of the research is to demonstrate how the production method and the metal structure affect the kinetics of the outer cage formation and, consequently, the strength of the product.

Materials and Methods. Samples made of 10Kh18N9 and VP 304.200.30 were radially compressed according to GOST 26529–85 and stretched on an UMM-5 testing machine. Hardness was measured using a Rockwell TP 5006 instrument, and microhardness was measured according to Vickers on an HVS-1000 instrument. X-ray phase analysis was performed on an XRD-6100 diffractometer. Microscopes *Tescan VEGA II LMU* (for electron probe studies), *Quanta 200* and *Altami MET-1M* (for studying microstructure and metallography) were used. Cold stamping of the outer cage with a spherical hinge flange was modeled in *QForm*.

Results. The strength and yield strength of VP 304.200.30 were comparable to those of some chromium-nickel austenitic steels, but were inferior in terms of ductility. A comparison between 10Kh18N9 and VP 304.200.30 revealed differences in their deformation mechanisms. The critical limitation for powder steel was not the oxide phase, but the localization of oxides at particle boundaries, which provoked brittle fracture under tension. Due to the chemical heterogeneity in the particles and residual porosity, powder steel had a 6-fold lower elongation compared to rolled steel. However, under compression conditions, sintered material could reach a hardness of 195 HV, making it suitable for use in the outer cage of spherical hinges.

Discussion. Analysis of the deformation characteristics of sintered and rolled steels confirmed the suitability of the proposed methodology for assessing the deformation state of samples during cold stamping of the outer cage of spherical hinges.

Conclusion. The findings from this study allow us to predict the locations of macrodefects and optimize the manufacturing process for spherical hinges.

Keywords: 10Kh18N9 rolled steel, VP 304.200.30 powder steel, outer race of spherical joint, microcracks in chromium-nickel steel

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Konko NA, Gasanov BG. Influence of the Production Method and the Structure of Chromium-Nickel Corrosion Resistant Steels on the Kinetics of the Formation of the Outer Cage of Spherical Joints. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):230–241. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-230-241>

Введение. В силу экономической и технической значимости задачи повышения эксплуатационного ресурса шарнирных узлов (элементов многих машин и механизмов) необходимо постоянно изучать материалы и технологии их изготовления. Отметим, например, что сферические шарнирные узлы, эффективно воспринимающие ударные нагрузки, широко применяются в подвесках транспортных средств [1]. При этом их делают из хромоникелевых коррозионно-стойких сталей, которые обладают низкой износостойкостью [2]. Критерий выбора этого металла для изготовления деталей сферических шарниров — эксплуатационные свойства при длительном контакте с агрессивными средами (солевые растворы, влага, продукты износа). Для повышения триботехнических свойств деталей узлов трения из хромоникелевых сталей [3] используются методы порошковой металлургии [4]. Однако технология производства зависит от химического состава материала [5], условий эксплуатации машин, конструкции узлов трения и других факторов [6]. Холодная штамповка — это один из вариантов формования деталей наружной обоймы сферических шарниров [7] из спеченных цилиндрических заготовок, внутренняя поверхность которых покрыта твердым смазочным материалом [8] (рис. 1).

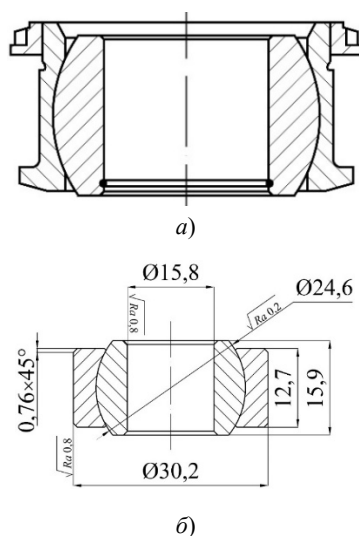


Рис. 1. Конструкция сферических шарнирных узлов: *а* — наружная обойма с фланцем; *б* — наружная обойма без фланца [1]

В открытом доступе нет информации о технологии изготовления наружной обоймы сферических шарниров из спеченных коррозионно-стойких сталей и об оценке их эксплуатационного ресурса. Это показал анализ современных отечественных научных публикаций и патентов. Таким образом, актуальны следующие задачи:

- обеспечение требуемых свойств и качества сферических шарниров [9];
- сокращение производственных затрат;
- повышение надежности инструментальной оснастки и средств технологического оснащения [10].

Коллектив авторов представленной статьи уже ведет научные изыскания в этом направлении. В [11] описаны эксперименты с порошковыми сталями 12X18H10T, 304L-AW-100 и ВП 304.200.30. Прессовки спекали 3 ч в вакууме при 1 200 °С. Однако этого недостаточно. Производственная и эксплуатационная практика существенно шире. А значит, нужны испытания разных коррозионно-стойких сталей в различных условиях. В данном случае рассматриваются:

- катаная коррозионно-стойкая хромоникелевая сталь 10X18H9;
- порошковая сталь ВП 304.200.30, которую спекали 2 ч при 1 150 °С.

Цель работы — выяснить, каким образом способ получения и структура 10X18H9 и ВП 304.200.30 влияет на кинетику формования наружной обоймы сферических шарниров. Развитие такого подхода в теоретическом и прикладном плане открывает возможность использовать данные о способе получения заготовок хромоникелевых сталей для прогнозирования их структурообразования, технологических, трибологических и механических свойств наружных обойм сферических шарниров.

Материалы и методы. Ранее проводились исследования с коррозионно-стойкими хромоникелевыми порошковыми сталями ВП 304.200.30, 304L-AW-100 и 12X18H10T [11]. В представленной работе основное внимание уделяется сравнительному анализу порошковой стали ВП 304.200.30 производства «Северсталь» (Россия) и его аналога — стали 10X18H9. Ожидается, что сравнение позволит установить корреляцию между технологией производства и физико-механическими, а также эксплуатационными свойствами образцов.

Кольцевые образцы изготавливались из катаной стали 10X18H9 (ГОСТ 5632–2014⁷) и порошковой коррозионно-стойкой хромоникелевой стали ВП 304.200.30 [11]. Геометрические размеры кольцевых образцов, мм:

- наружный диаметр втулки (D_n) — 25;
- внутренний диаметр втулки (d_v) — 19,5;
- высота втулки (H) — 15.

Образцы получили механической обработкой из круглого проката 10X18H9 и статическим холодным прессованием порошка ВП 304.200.30 на гидравлическом прессе НРМ-60L в цилиндрической пресс-форме [11]. Давление прессования варьировали в пределах 600–800 МПа. Порошковые формовки спекали в вакуумной электропечи ВСл-16-22-У при температуре 1150 °С в течение 2 ч. Пористость заготовок после спекания составляла 14–22 %. Перед холодной штамповкой на внутреннюю поверхность цилиндрической втулки наносили твердые смазочные материалы: дисульфид молибдена (MoS_2) (ТУ 48–19–133–90⁸), карандашный графит (ГОСТ 23463–79⁹) и политетрафторэтилен (PTFE, ГОСТ 10007–80¹⁰) [11].

Для оценки критических значений деформаций при холодной штамповке выточенные из прутка и спеченные кольцевые образцы испытывали на радиальное сжатие (рис. 2) по методике, описанной в ГОСТ 26529–85¹¹.

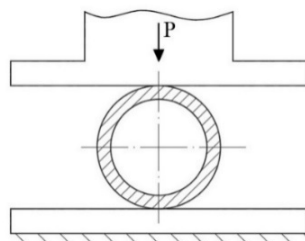


Рис. 2. Схема испытания кольцевого образца на радиальное сжатие

По методике, описанной в ГОСТ 1497–84¹², изготовили призматические образцы для экспериментов по растяжению на универсальной испытательной машине УММ-5 (ГОСТ 28840–90¹³).

Для определения твердости образцов использовали прибор Роквелла ТР 5006 (ГОСТ 9013–59¹⁴). Микротвердость измеряли по методу Виккерса (ГОСТ 9450–76¹⁵) на приборе HVS-1000.

Микроструктуру исследовали на металлографическом микроскопе *Altami MET-1M* и растровом электронном *Quanta 200*. Электронно-зондовые изыскания выполняли на растровом электронном микроскопе *Tescan VEGA II LMU*. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре *XRD-6100* с вертикальным гониометром θ –2 θ .

Зарождение и развитие трещин обусловлено превышением предельных значений деформации [12], поэтому ее величина при холодной штамповке порошковых заготовок критически важна и требует контроля на каждом этапе формообразования [13]. Для анализа деформированного состояния изделий применяли специализированное программное обеспечение [14], расчетные схемы, имитационное моделирование в программе *QForm*.

Результаты исследования. Деформированное состояние материала кольцевых образцов влияет на их твердость после радиальной деформации (ϵ_R). Для оценки относительной степени деформации измеряли твердость по методу Виккерса на разных участках кольцевых образцов (рис. 3 а).

⁷ ГОСТ 5632–2014. *Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113778?ysclid=mdohk7rxu9621196527> (дата обращения: 21.06.2025).

⁸ ТУ 48–19–133–90. *Дисульфид молибдена. Технические условия*. URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4293788/4293788422.pdf> (дата обращения: 21.06.2025).

⁹ ГОСТ 23463–79. *Графит порошковый особой чистоты*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200014916> (дата обращения: 21.06.2025).

¹⁰ ГОСТ 10007–80. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020654> (дата обращения: 21.06.2025).

¹¹ ГОСТ 26529–85. *Материалы порошковые. Метод испытания на радиальное сжатие*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011117?ysclid=mdoi2gfjlh811854453> (дата обращения: 21.06.2025).

¹² ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (дата обращения: 21.06.2025).

¹³ ГОСТ 28840–90. *Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023577> (дата обращения: 21.06.2025).

¹⁴ ГОСТ 9013–59. *Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004663?ysclid=mdpkjnihrw605168957> (дата обращения: 21.06.2025).

¹⁵ ГОСТ 9450–76. *Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012869?ysclid=mdpkn680t1373636400> (дата обращения: 21.06.2025).

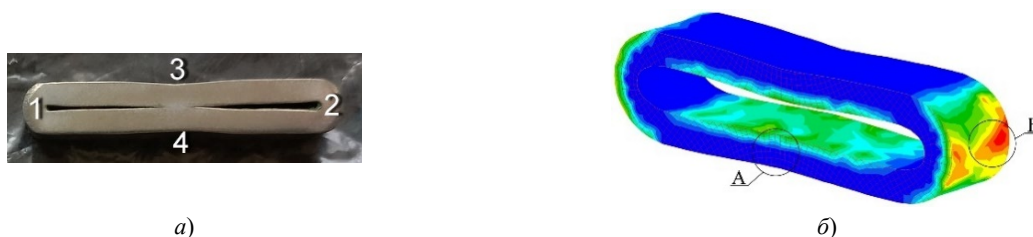


Рис. 3. Радиальная осадка кольцевых образцов: *a* — катаная сталь 10X18H9;
б — имитационное моделирование радиальной осадки из распыленного порошка ВП 304.200.30

Твердость в разных зонах кольцевых образцов существенно отличается. Например, в зонах растяжения 1 и 2 для кольцевых образцов из стали 10X18H9 твердость варьируется от 190 HV до 205 HV. Показатель для спеченной стали ВП 304.200.30 — 130–140 HV. В зонах сжатия 3 и 4 твердость немного выше: 210–230 HV для 10X18H9 и 185–195 HV для ВП 304.200.30.

Это можно объяснить тем, что напряженно-деформированное состояние материала зависит от конфигурации заготовок до и после радиальной осадки. В зоне А (3 и 4) материал в результате пластической деформации (наклепа) упрочняется лучше, чем в зонах растяжения Б (1 и 2) (рис. 3 б).

Из [11] известно, что при осадке спеченных кольцевых образцов с аустенитной структурой и пористостью 18–20 % (рис. 4 а) трещины появляются на межчастичных границах с повышенной концентрацией Cr_2O_3 , CrO_2 (рис. 4 б). Анализ результатов картирования устья трещины показал, что микротрещины развиваются:

- по межчастичным границам с более высокой концентрацией О;
- на неоднородных по химическому составу участках (рис. 4 в).

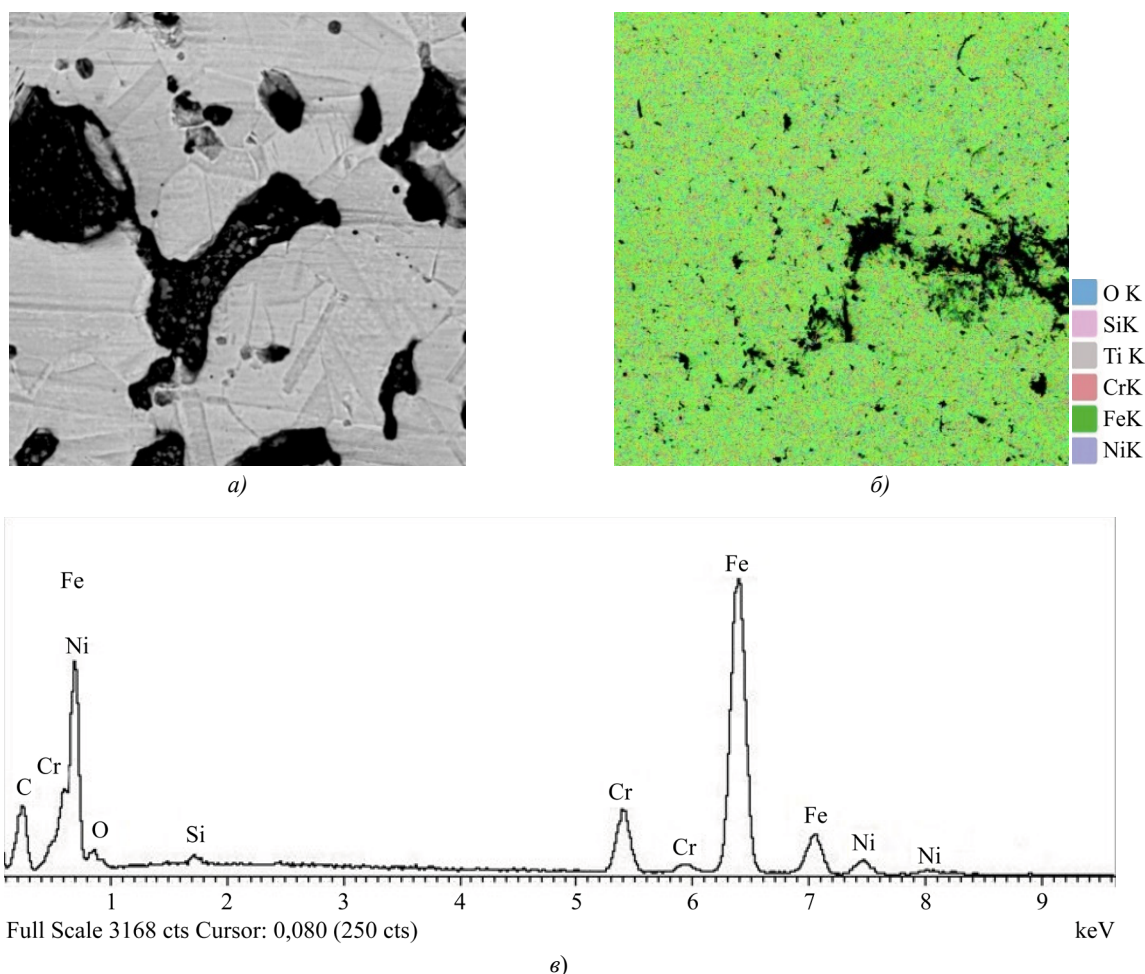


Рис. 4. Картирование спеченного кольцевого образца из порошка ВП 304.200.30 (Si — 0,7, Cr — 12,2, Fe — 75,5, Ni — 7,90, O — 3,7): *a* — микроструктура перед испытанием;
б, в — распределение химических элементов в устье трещины после радиальной деформации

На пластические свойства спеченных сталей особенно сильно влияет распределение оксидов и карбидов хрома в зонах интенсивной пластической деформации. Это подтверждает картирование участков микрошлифов в устье трещины (рис. 5).

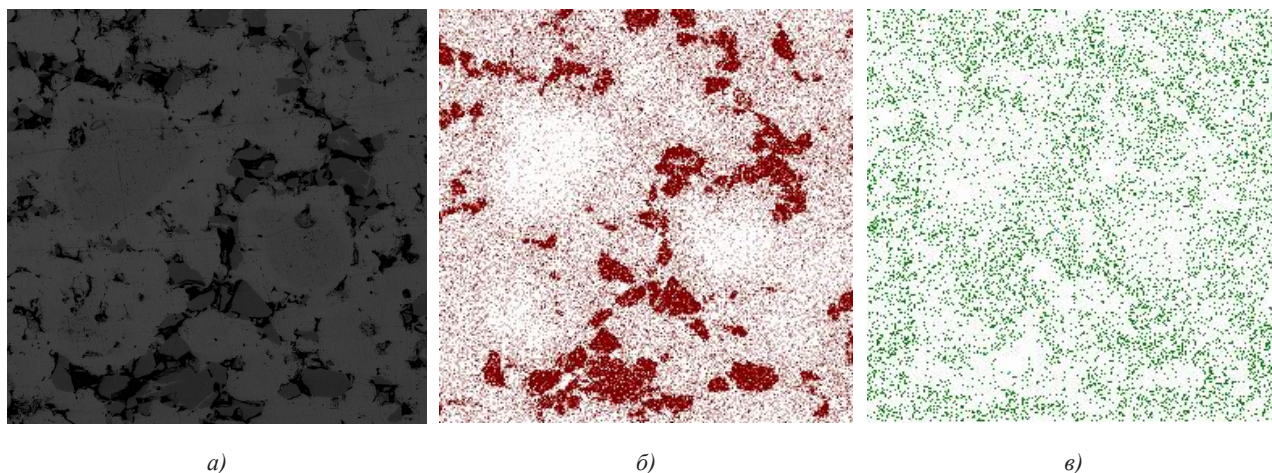


Рис. 5. Картирование спеченной хромоникелевой стали ВП 304.200.30:
а — микроструктура; б — распределение Cr; в — распределение Ni

В образцах из катаной стали 10Х18Н9 структура стали более гомогенная по хрому и никелю (рис. 6 а). Содержание инородных включений значительно меньше, чем в спеченной стали из распыленных порошков аналогического состава (рис. 6 б, в).

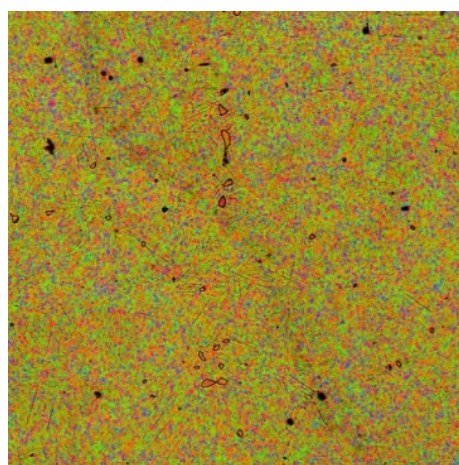
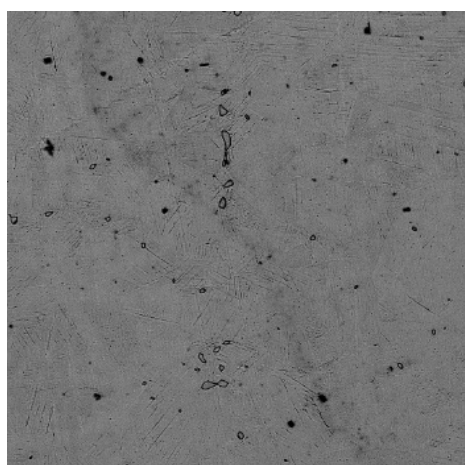
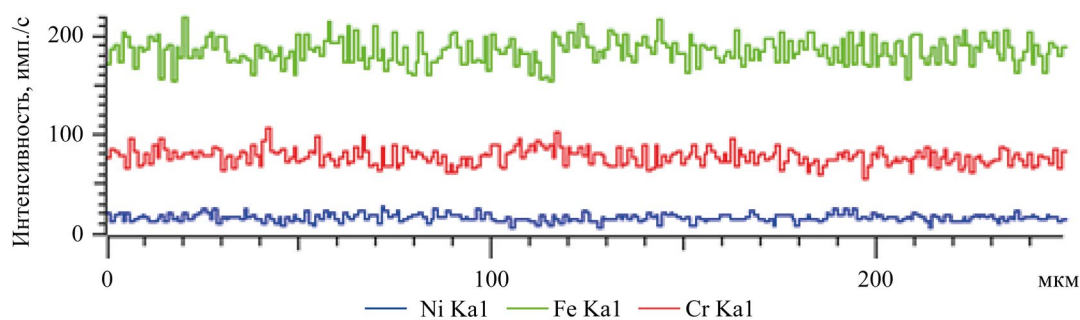


Рис. 6. Картирование стали 10Х18Н9:
а — распределение Cr и Ni; б, в — микроструктура

При осадке кольцевых образцов сдвиговую деформацию материала обеспечивают разные механизмы. Их вклад определяется схемой и степенью, размером, формой зерна и пористостью заготовок до деформации, химическим и фазовым составом материала (рис. 7 а), свойствами и размером избыточных фаз и другими условиями.

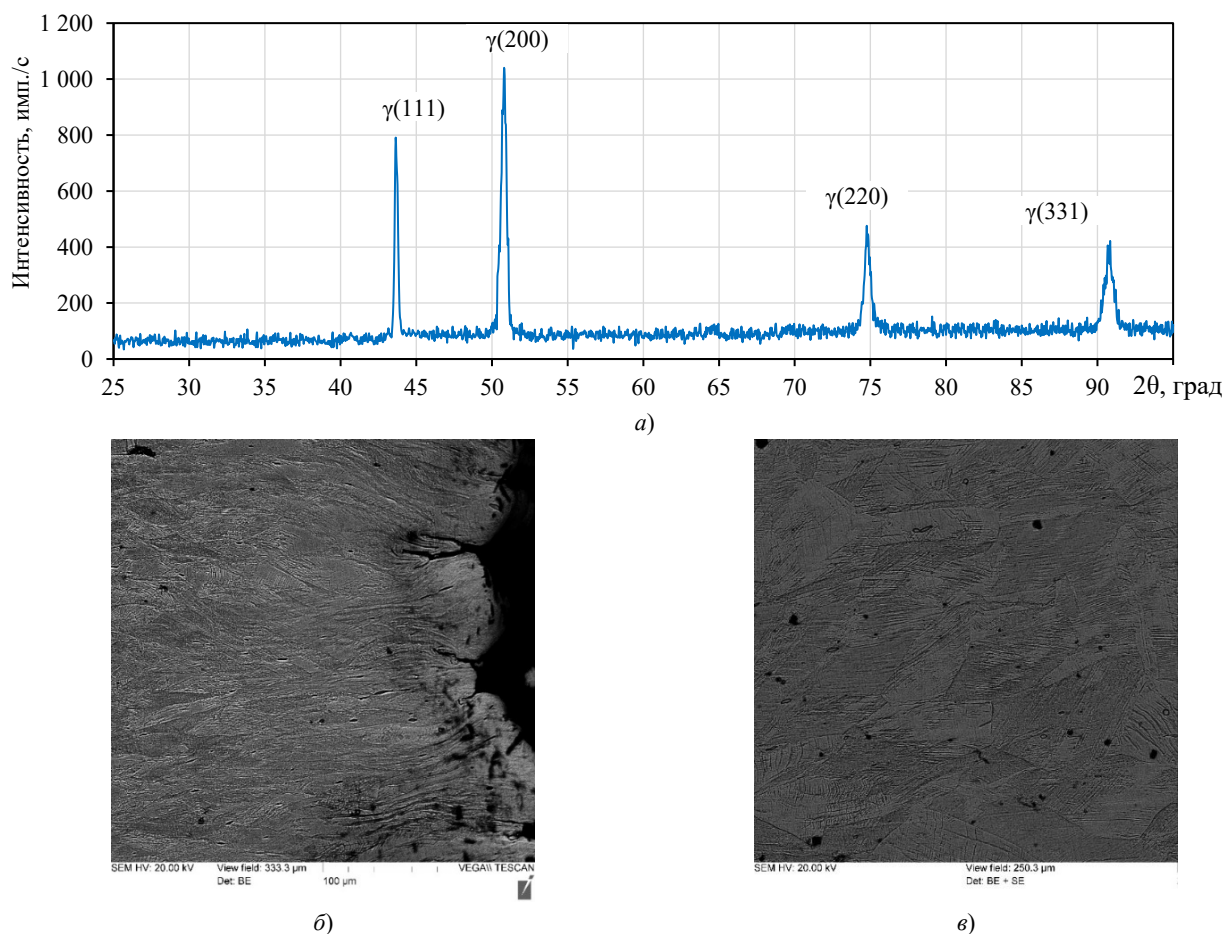


Рис. 7. Фазовый анализ и микроструктура катаной стали 10X18N9: а — дифрактограмма после радиального обжатия; б — микроструктура колец в зоне сжатия; в — микроструктура в зоне растяжения после осадки $\epsilon_R = 63\%$

Поэтому наличие на отдельных участках строчечной структуры, характерной для катаных хромоникелевых сталей аустенитного класса (рис. 7 а), не только снижает их пластические свойства, но и влияет на кинетику формирования микроструктуры после холодной штамповки. Неоднородная деформация на разных участках образца — причина двойникования, полос сброса и переходных полос (рис. 7 б, в).

На механические свойства спеченных заготовок из порошков хромоникелевых сталей ВП 304.200.30 влияют:

- исходная микроструктура и наличие инородных включений;
- микроструктура и химический состав частиц, сформированных в процессе распыления расплава и охлаждения частиц порошка.

По-видимому, при быстром охлаждении в каплях жидкого расплава образуются устойчивые зародыши α -фазы с повышенной концентрацией железа (рис. 8 а). В частности, в таких частицах, имеющих сферическую форму (таблица 1, рис. 8, спектр 3), содержится около 91 % (ат.) железа, а в зародышах других частиц (табл. 1, рис. 8, спектр 2) — около 80 %. На других участках этих же частиц содержание Cr достигает 74 % (ат., таблица 1, рис. 8, спектр 1). Это в несколько раз больше, чем его средняя концентрация в порошках стали. Под словом «спектр» в данном случае понимается место и порядок укола на исследованном микрошлифе.

Таблица 1

Распределение химических элементов в спеченной стали из порошка ВП 304.200.30 на различных участках частиц в образцах перед холодной штамповкой

Спектр	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Всего
1	0,07	74,63	0,70	24,29	0,31	100
2	2,24	10,25	0,31	80,22	6,99	100
3	1,03	6,12	0,09	91,28	1,49	100

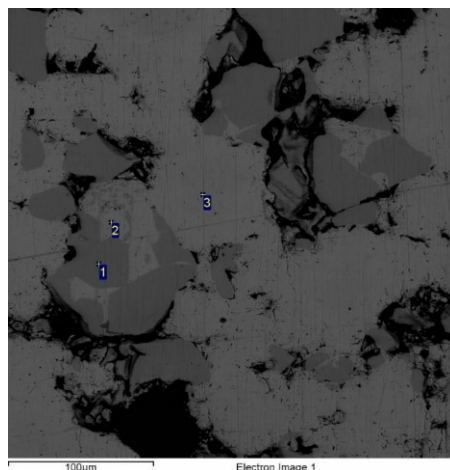
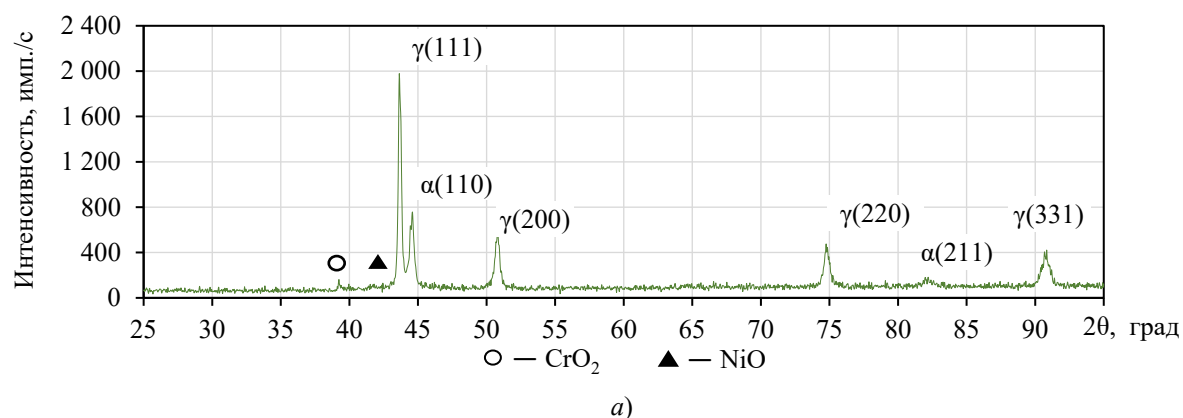


Рис. 8. Фазовый состав и микроструктура образцов перед холодной штамповкой в спеченной стали из порошка ВП 304.200.30: *a* — дифрактограмма; *б* — распределение хрома, никеля и других элементов

В процессе спекания образцов из распыленных порошков ВП 304.200.30 при температуре 1150–1180 °С в течение 2 ч происходит диффузионная гомогенизация. Хром, никель и железо взаимно растворяются и распределяются по объему более равномерно (рис. 9), что в целом влияет на пластичность спеченных в вакууме заготовок.

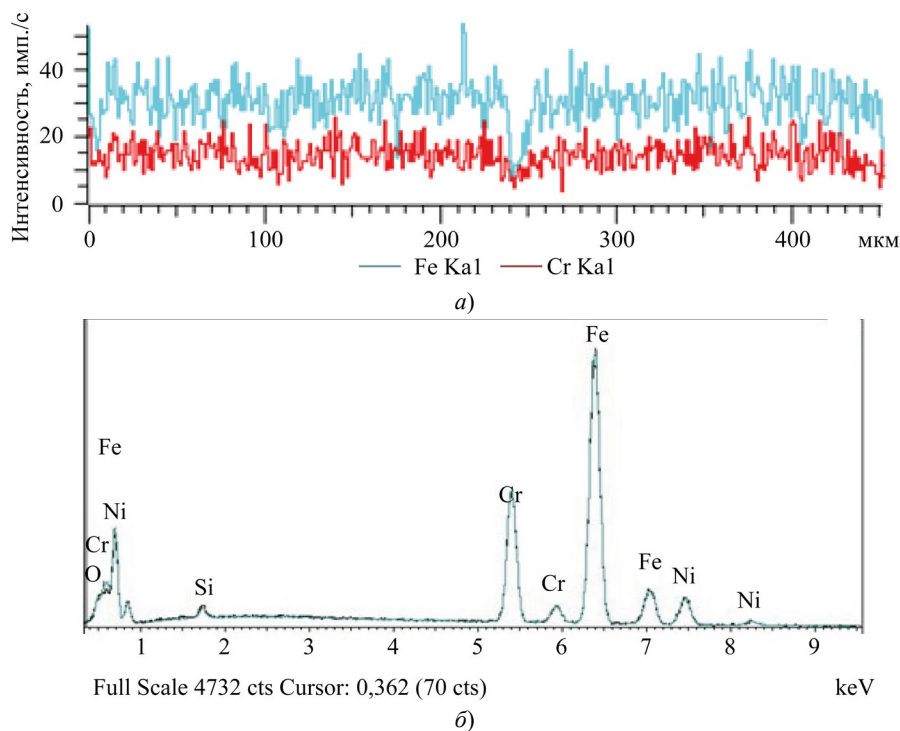


Рис. 9. Распределение химических элементов в спеченной стали из порошка ВП 304.200.30: *a* — линейное распределение Cr и Fe; *б* — спектральный анализ Cr, Ni и др. элементов

Чем крупнее пора в межчастичных границах, тем больше разница в деформации частиц, особенно при небольших средних деформациях материала. Поэтому на разных участках одной и той же зоны заметно отличается микроструктура спеченной стали после осадки и, соответственно, микротвердость (рис. 10).

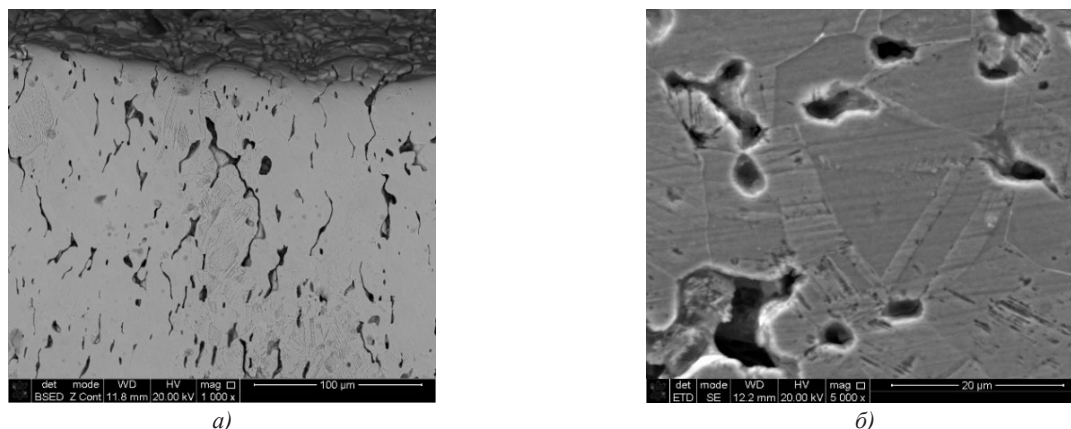


Рис. 10. Микроструктура спеченной стали ВП 304.200.30:
а — зона сжатия (А); б — зона растяжения (Б) после осадки $\epsilon_R \approx 0,5$

Предел прочности спеченных в вакууме сталей из порошка ВП 304.200.30 соизмерим с прочностью и пределом текучести некоторых хромоникелевых сталей аустенитного класса, но уступает им по показателям пластичности (таблица 2).

Таблица 2

Физико-механические свойства хромоникелевых коррозионно-стойких сталей

Материал	Свойства					
	σ_s , МПа	δ , %	Ψ , %	П, %	ρ , г/куб., см	Твердость
10X18H9	195	45	55	—	7,9	29 HRC
ВП 304.200.30	180,63	7,67	8,08	19,05	6,65	45 HRB

Таким образом, анализ механизма разрушения при осадке колец из нержавеющей хромоникелевых сталей показывает, что прочность и пластичность спеченной стали в зоне растяжения зависят не только от напряженно-деформированного состояния материала. В данном случае имеют значение еще два фактора:

- качество контакта между частицами;
- наличие на поверхности распыленных порошков инородных включений.

Моделирование процесса холодной штамповки наружной обоймы с фланцем сферического шарнира в программе *QForm* (рис. 11) дает представление о кинетике формообразования [15]. Использовались спеченные цилиндрические заготовки из порошка ВП 304.200.30. Минимальный ресурс пластичности имеет зона, выделенная темно-зеленым цветом. Именно здесь могут зарождаться макро- и микротрещины.

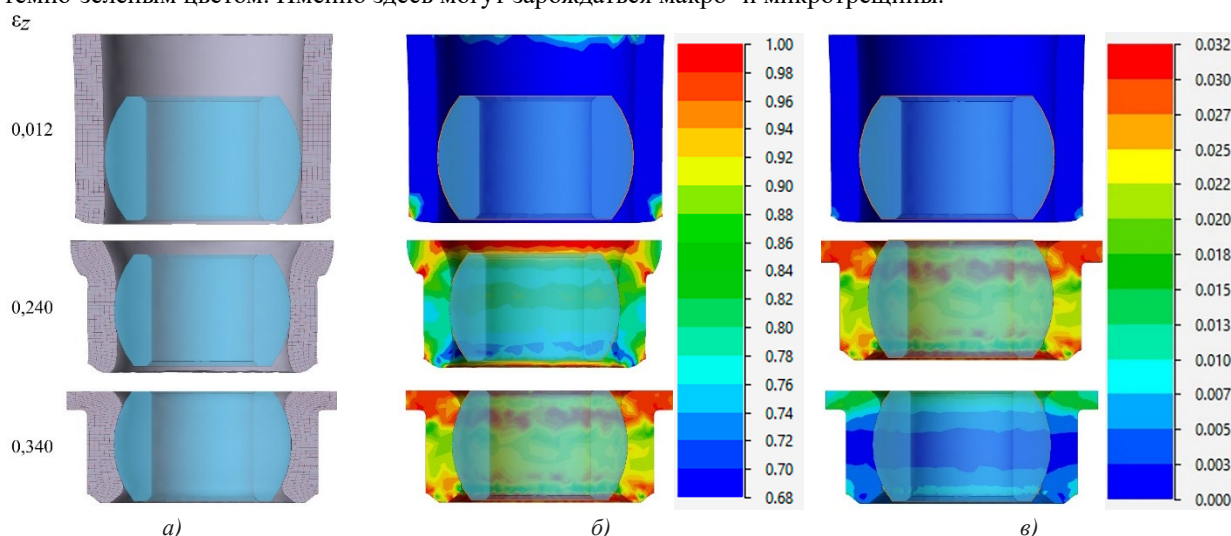


Рис. 11. Имитационное моделирование кинетики формования наружной обоймы с фланцем пористой заготовки в программе *QForm*: а — изменение координатной сетки; б — распределение по объему относительной плотности; в — ресурс пластичности

На рис. 11 ε_z — безразмерная величина. Это относительная степень деформации, то есть отношение абсолютной деформации (изменения размера) к первоначальной длине тела. При моделировании на торец образца наносили координатную сетку. В процессе деформации материала она искажалась. Соответственно, на рис. 11 можно видеть, в каком направлении движется материал при деформации.

Сравнение катаной стали 10X18H9 и порошковой ВП 304.200.30 выявило фундаментальные различия в механизмах деформации. Для порошковой стали критическим ограничением является не оксидная фаза, а локализация оксидов на границах частиц, что провоцирует хрупкое разрушение при растяжении. Химическая неоднородность частиц и остаточная пористость усугубляют проблему: в сравнении с катаной сталью относительное удлинение снижается в 6 раз (показатель δ в таблице 2). При этом в условиях сжатия спеченный материал упрочняется до 195 HV, и это говорит о возможности его использования в производстве наружных обойм сферических шарниров.

Обсуждение. Итак, при деформации спеченных заготовок интенсивность полей напряжений в зонах контактов частиц порошков и на поверхности пор существенно отличается от средних показателей. Согласно [11], критическое значения интенсивности деформации при радиальной осадке кольцевых образцов из порошка ВП 304.200.30 — 0,195. Это обуславливает неоднородность деформаций, а также исключает определение деформированного состояния по условию пластичности (если известно напряженное состояние). Схемы главных деформаций предопределяют неравномерный и анизотропный характер изменения механических свойств спеченных заготовок при холодной штамповке, поэтому на ресурс пластичности влияет не только пористость, но и деформированное состояние материала. Это установлено экспериментально.

Анализ описанных в статье особенностей деформационного поведения спеченных и катаных сталей подтверждает адекватность предложенной методики оценки деформированного состояния цилиндрических заготовок при холодной штамповке наружной обоймы сферических шарниров. Практическое использование результатов данного исследования позволит повысить эффективность технологии производства хромоникелевых сталей. Итоги научных изысканий, описанных в статье, позволяют предположить, что такой материал будет оптимальным для сферических шарниров.

Заключение. Выявленный механизм разрушения спеченных хромоникелевых сталей при холодной штамповке позволяет оценить критические значения интенсивности деформации и влияние структуры стали на ее пластичность в зоне растяжения.

Установлено, что ресурс пластичности спеченных хромоникелевых нержавеющей сталей зависит не только от напряженно-деформированного состояния материала, но и от исходной структуры, наличия примесей, а также качества межчастичных контактов и границ зерен.

Авторы фокусировались на качественных особенностях обойм сферических шарниров, применяемых в подвесках транспортных средств. Эксперименты и моделирование показали технологические особенности их производства при холодной штамповке спеченных заготовок.

Список литературы / References

1. Михайлов А.Н., Матвиенко С.А., Стрельник Ю.Н., Лукичев А.В. Функционально-ориентированный анализ условий эксплуатации и технологий изготовления сферических шарнирных соединений транспортных машин. В: *Материалы международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» Петропавловск-Камчатский, 17–19 октября 2018 года*. Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет; 2019. С. 112–115.

Mikhailov AN, Matvienko SA, Strelnik YuN, Lukichev AV. Functionally-Oriented Analysis of the Operating Conditions and Production Technologies of Transport Vehicles Spherical Swivel Connections. In: *Proceedings of the International Scientific and technical conference “Technical operation of Water Transport: Problems and Ways of Development” Petropavlovsk-Kamchatsky, 17–19 October, 2018*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka State Technical University; 2019. P. 112–115. (In Russ.)

2. Хайдоров А.Д., Юнусов Ф.А. Вакуумная термическая обработка высоколегированных коррозионно-стойких сталей. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2017;23(1):226–235. <http://doi.org/10.18721/JEST.230123>

Haidorov AD, Yunusov FA. Vacuum Heat Treatment of high Alloy Corrosion-Resistant Steels. *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology*. 2017;23(1):226–235. (In Russ.) <http://doi.org/10.18721/JEST.230123>

3. Woodhead J, Truman CE, Booker JD. Modelling of Dynamic Friction in the Cold Forming of Plain Spherical Bearings. *Surface and Contact Mechanics Including Tribology XII*. 2015;91:141–152. <http://doi.org/10.2495/SECM150131>

4. Ильющенко А.Ф. Современные разработки в области порошковой металлургии для машиностроения. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012;(3(20)–4(21)):113–120. URL: https://mmmm.by/pdf/ru/2012/3_4_2012/11.pdf (дата обращения: 02.06.2025).

Ilyuschenko AF. Current Developments in Powder Metallurgy for Mechanical Engineering. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2012;(3(20)–4(21)):113–120. (In Russ.) URL: https://mmmm.by/pdf/ru/2012/3_4_2012/11.pdf (accessed: 02.06.2025).

5. Hojati M, Danninger H, Gierl-Mayer Ch. Mechanical and Physical Properties of Differently Alloyed Sintered Steels as a Function of the Sintering Temperature. *Metals*. 2022;12(1):13–20. <https://doi.org/10.3390/met12010013>

6. Bram M, de Freitas Daudt N, Balzer H. Porous Metals from Powder Metallurgy Techniques. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. 2022;3:427–437. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00093-4>

7. Lingzhu Gong, Xiaoxiang Yang, Kaibin Kong, Shuncong Zhong. Optimal Design for Outer Rings of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings Based on Virtual Orthogonal Experiments. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(6):1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814018783402>

8. Гасанов Б.Г., Конько Н.А., Баев С.С. Исследование кинетики формообразования деталей сферического подшипника скольжения из коррозионно-стойких сталей, полученных объемной штамповкой пористых заготовок. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2024;26(2):127–142. <http://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.2-127-142>

Gasanov BG, Konko NA, Baev SS. Study of the Kinetics of Forming of Spherical Sliding Bearing Parts Made of Corrosion-Resistant Steels by Die Forging of Porous Blanks. *Metal Working and Material Science*. 2024;26(2):127–142. (In Russ.) <http://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.2-127-142>

9. Rozenberg OA, Mikhailov OV, Shtern MB. Strain Hardening of Porous Bushings by Multiple Mandreling: Numerical Simulation. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012;51:379–384. <http://doi.org/10.1007/s11106-012-9445-y>

10. Kondo H, Hegedus M. Current Trends and Challenges in the Global Aviation Industry. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2020;26(4):141–143. <https://doi.org/10.36547/ams.26.4.763>

11. Гасанов Б.Г., Конько Н.А., Баев С.С. Влияние способа получения порошков хромоникелевых нержавеющей сталей на деформированное состояние и свойства внешней обоймы сферического шарнирного узла. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2024;5:138–158. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2024.5.138-158>

Gasanov BG, Konko NA, Baev SS. The Effect of the Method for Producing Chromium-Nickel Stainless Steel Powders on the Strain State and Properties of the Outer Cage of a Spherical Hinge Joint. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2024;5:138–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2024.5.138-158>

12. Ковальченко М.С. Деформационное упрочнение порошкового тела при прессовании. *Порошковая металлургия*. 2009;(3/4):13–27.

Kovalchenko MS. Deformation Hardening of a Powder Body during Pressing. *Powder Metallurgy*. 2009;(3/4):13–27. (In Russ.)

13. Егоров М.С., Егорова Р.В., Пустовойт В.Н., Атрохов А.А. Механические свойства порошковых материалов после свободной осадки. *Металлург*. 2020;3:92–96.

Egorov MS, Egorova RV, Pustovoit VN, Atrokhov AA. Mechanical Properties of Powder Materials after Hot Forging. *Metallurg*. 2020;3:92–96. (In Russ.)

14. Бурлаков И.А., Забелян Д.М., Бондаренко А.К., Гладков Ю.А., Леонидов А.Н. Рациональное использование ресурса пластичности при холодной штамповке листовых заготовок на основе критериев Кокрофта и Колмогорова. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. 2016;(12):3–8.

Burlakov IA, Zabelyan DM, Bondarenko AK, Gladkov YuA, Leonidov AN. Efficient Utilization of the Plasticity Resource at Cold Forming of Sheet Workpieces Based on the Cockcroft and Kolmogorov Criteria. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2016;(12):3–8. (In Russ.)

15. Баглюк Г.А., Курихин В.С., Хоменко А.И., Козаченко И.С. Совершенствование методов исследования распределения деформации при прессовании порошков. *Порошковая металлургия*. 2015;54:129–135. <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9689-4>

Baglyuk GA, Kurikhin VS, Khomenko AI, Kozachenko IS. Improving Methods for Studying the Strain Distribution in Powders During Compaction. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015;54:129–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9689-4>

Об авторах:

Николай Андреевич Конько, ассистент кафедры «Общеинженерные дисциплины», Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), konko2013@mail.ru

Бадрудин Гасанович Гасанов, доктор технических наук, профессор кафедры «Международные логистические системы и комплексы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), gasanov.bg@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Н.А. Конько: формальный анализ, проведение исследования, разработка методологии, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

Б.Г. Гасанов: создание концепции, курирование работы с данными, научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Nikolai A. Konko, Assistant Professor of the Department of General Engineering Disciplines, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI) (132, Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), konko2013@mail.ru

Badrudin G. Gasanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of International Logistics Systems and Complexes, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI) (132, Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), gasanov.bg@gmail.com

Claimed Contributorship:

NA Konko: formal analysis, research, methodology, validation, visualization, writing – original draft preparation.

BG Gasanov: conceptualization, data curation, supervision.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 30.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.07.2025

Принята к публикации / Accepted 25.07.2025