

Л. Н. Дьячкова

Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь

ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ПСЕВДОСПЛАВОВ СТАЛЬ – МЕДНЫЙ СПЛАВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ИНФИЛЬТРАЦИЕЙ, ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Аннотация. Исследовано влияние режимов пластической деформации получаемых инфильтрацией псевдосплавов сталь – медный сплав на их структуру, механические свойства и анизотропию свойств. Установлено, что горячая штамповка псевдосплавов при температурах 700–950 °С обеспечивает повышение прочности в 1,5–3 раза, ударной вязкости – в 1,5–2,5 раза, пластичности – на 1,5–2 %, а при 1100–1150 °С (выше температуры плавления меди) – приводит к растрескиванию материала. Показано, что свойства псевдосплавов на основе стали, легированной хромом, ниже, чем на основе стали, легированной никелем, что связано с образованием оксидов хрома вследствие его повышенного сродства к кислороду. Установлено образование макротекстуры в псевдосплавах после горячей штамповки, что приводит к вторичной анизотропии свойств, уровень которой определяется степенью деформации и температурой и не превышает 15–20 %. Построена деформационная кривая псевдосплава при горячей штамповке, выявившая оптимальную температуру (700–900 °С) и предельную степень деформации (65 %) в зависимости от состава псевдосплава. При повышении степени деформации происходит образование микротрещин на границе железной и медной фаз, что в свою очередь приводит к снижению прочности, пластичности, а также в 1,5–2 раза ударной вязкости псевдосплавов с содержанием медной фазы 15 % и разрушению псевдосплавов с содержанием медной фазы 25 %, в которых протяженность межфазных железомедных границ значительно больше. Достигнутые механические свойства горячештампованных псевдосплавов сталь – медный сплав позволяют использовать их для деталей тяжело нагруженных узлов трения, а также деталей конструкционного назначения.

Ключевые слова: псевдосплав на основе железа, инфильтрация, горячая деформация, структура, свойства, анизотропия

Для цитирования: Дьячкова, Л. Н. Закономерности упрочнения псевдосплавов сталь – медный сплав, получаемых инфильтрацией, при горячей пластической деформации / Л. Н. Дьячкова // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 2. – С. 156–166. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-156-166>

Larisa N. Dyachkova

O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus

PECULIARITIES OF HARDENING OF STEEL – COPPER ALLOY PSEUDO-ALLOYS OBTAINED BY INFILTRATION DURING HOT PLASTIC DEFORMATION

Abstract. The influence of the regimes of plastic deformation of steel – copper alloy pseudo-alloys obtained by infiltration on their structure, mechanical properties and anisotropy of properties is investigated. It has been established that hot forging of pseudo-alloys at a temperature of 700–950 °C provides an increase in strength by 1.5–3 times, impact strength by 1.5–2.5 times, plasticity by 1.5–2 %, and at 1100–1150 °C (above the melting point of copper) – leads to cracking of the material. It is shown that the properties of pseudo-alloys based on steel alloyed with chromium are lower than those based on steel alloyed with nickel, which is associated with the formation of chromium oxides due to its increased affinity for oxygen. The formation of macro-texture in pseudo-alloys after hot stamping has been established, which leads to secondary anisotropy of properties, the level of which is determined by the degree of deformation and temperature, but does not exceed 15–20 %. The deformation curve of the pseudo-alloy during hot forging was constructed, which revealed the optimum temperature (700–900 °C) and the limiting degree of deformation (65 %) depending on the composition of the pseudo-alloy. With an increase in the degree of deformation, microcracks form at the interface between the iron and copper phases, which in turn leads to a decrease in strength, ductility, as well as a 1.5–2-fold decrease in the impact strength of pseudo-alloys with a copper phase content of 15 % and destruction of pseudo-alloys with a 25 % copper content phases, in which the length of interphase iron-copper boundaries is much greater. The achieved mechanical properties of hot-forged steel-copper alloy pseudo-alloys make it possible to use them for parts of heavily loaded friction units, as well as parts for structural purposes.

Keywords: iron based pseudo-alloy, infiltration, hot deformation, structure, properties

For citation: Dyachkova L. N. Peculiarities of hardening of steel – copper alloy pseudo-alloys obtained by infiltration during hot plastic deformation. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 2, pp. 156–166 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-156-166>

Введение. Существенное снижение надежности и долговечности механизмов в грузовых машинах, различного вида насосах станочного оборудования и дорожных машин, прокатных станах, печах для отжига силикатных изделий, строительной и горнодобывающей технике связано с износом узлов трения [1, 2]. Это вызывает потребность в узлах трения, работающих в тяжелых условиях (при высоких удельных нагрузках, в широком температурном диапазоне, в агрессивной среде). Вследствие высоких нагрузок при тяжелом режиме эксплуатации смазочный слой теряет сплошность, коэффициент трения повышается, соответственно растет температура в зоне трения [3]. В связи с этим особое значение для работоспособности тяжело нагруженного узла трения имеют не только удовлетворительные триботехнические характеристики, но и высокая прочность, теплопроводность, коррозионная и жаростойкость антифрикционных материалов. Анализ достижений современного трибоматериаловедения позволяет сделать вывод о том, что антифрикционные материалы нового поколения для тяжело нагруженных режимов работы должны иметь гетерогенную структуру и, согласно основному принципу конструирования антифрикционных материалов, состоять из компонентов, существенно различающихся по твердости [4, 5]. Такому строению в большей степени отвечают псевдосплавы, представляющие собой материалы, которые состоят из компонентов, слабо или не взаимодействующих между собой, чьи физические и механические свойства могут различаться на несколько порядков [6]. Перспективным процессом получения высокоплотных псевдосплавов системы железо–медь является инфильтрация медью или медными сплавами каркаса на основе железа, полученного методом порошковой металлургии [7]. Поскольку при инфильтрации остаточная пористость может составлять 5–7 % и возможно наличие крупных пор (более 20 мкм), недопустимых в ряде изделий, например в стеклоформирующем инструменте, целесообразно проводить холодную и горячую пластическую деформацию заготовок из псевдосплавов.

Горячая штамповка занимает первое место среди других методов получения высокоплотных высокопрочных порошковых изделий [8, 9], достаточно хорошо изучена и производится по различным схемам [10–22]. Горячая штамповка пористых заготовок происходит в две стадии [16]: на первой стадии идет уплотнение заготовки до предельной плотности (90–95 %), на второй – происходят процессы пластической деформации и доуплотнения. На практике разделить эти стадии практически невозможно, так как они накладываются одна на другую, и можно говорить лишь о преимущественном их действии.

При горячей штамповке псевдосплавов практически отсутствует стадия объемного уплотнения, потому что пористость их не превышает 5–7 %. В связи с этим доуплотнение происходит на стадии деформации. Процессы структурообразования и деформации псевдосплавов при горячей штамповке отличаются от компактных и пористых однородных материалов из-за наличия в них двух фаз с различными механическими и физическими свойствами, которые по-разному ведут себя при высокотемпературной деформации.

Цель настоящей работы – исследование влияния горячей пластической деформации на изменение структуры и свойств псевдосплавов порошковая сталь – медный сплав, получаемых инфильтрацией.

Методика исследований. В качестве объекта исследования использовали псевдосплавы, которые изготавливались инфильтрацией медью спрессованных каркасов из железа, углеродистой стали ПК80, никелевой стали ПК80Н4, хромистой стали ПК80Х3.

Шихту на основе железа получали смешиванием в шаровом смесителе типа «пьяная бочка» в течение 1 ч исходных порошков железа, меди и графита в состоянии поставки со средним размером частиц соответственно 160, 70 и 20 мкм. Шихту прессовали до плотности 75, 80 и 85 %.

Инфильтрацию проводили в атмосфере эндогаза при температуре 1120 °С.

Исследовали влияние степени деформации при холодной и горячей штамповке, а также температуры штамповки на механические свойства и структуру псевдосплавов. Холодную деформацию

осуществляли доуплотнением в пресс-форме при давлении 800 и 1000 МПа свободной осадкой, горячую деформацию – штамповкой по схеме одноосной осадки в штампе. Температура штамповки псевдосплавов с каркасом из никелевой и хромистой стали составляла 700–1000 °С через каждые 50 °С, с каркасом из железа и углеродистой стали – 700 и 900 °С соответственно. Заготовки перед нагревом под штамповку покрывали смазкой из коллоидного графита, которая предохраняла их от окисления в процессе нагрева и штамповки. Степень деформации, рассчитанная по изменению высоты заготовки, составляла 15 %, 30, 45, 65 %. Штамп перед экспериментом нагревали путем деформации нескольких заготовок, при этом достигалась его стабильная температура.

Поскольку псевдосплавы обладают повышенной коррозионной стойкостью, нагрев заготовок проводили на воздухе.

Механические свойства оценивали при испытании на растяжение, сжатие, по твердости и вязкости. Испытания на растяжение и сжатие выполняли на испытательной машине Instron со скоростью нагружения 2 мм/мин, твердость определяли на твердомере по Бринеллю при нагрузке 187,5 Н и диаметре шарика 2,5 мм, ударную вязкость – на копре IT406 фирмы Tinius Olsen (Великобритания).

Структуру исследовали на металлографическом микроскопе MEF-3 (Австрия), шлифы травили 4%-ным раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте, а также на электронном микроскопе Miра (Чехия).

Результаты исследований и их обсуждение. Исследование доуплотнения при холодной деформации показало, что максимальная степень деформации при свободной осадке составила 10 %. При большей степени деформации происходит разрушение образцов. Уплотнения и повышения свойств псевдосплавов при такой обработке не наблюдалось.

Доуплотнение в пресс-форме при комнатной температуре привело к незначительному уменьшению пористости и повышению прочности на 30–40 МПа только у псевдосплава с каркасом из железа с исходной плотностью 75 %.

При горячей штамповке при температуре 1100–1150 °С (выше температуры плавления меди) медная фаза в псевдосплаве переходит в жидкое состояние, и в процессе деформации происходит ее выдавливание из стального каркаса и растрескивание образцов. В [23] авторы также отмечали, что под действием внешних растягивающих напряжений возникновение расплава вдоль границ зерен приводит к катастрофическому разрушению твердого тела.

Максимальная пластичность и вязкость псевдосплавов, как показали исследования, достигались при степени деформации 45 %, прочность – при 30 %. При деформации со степенью более 65 % происходило разрушение образцов из псевдосплавов с плотностью каркаса 75 %, а с плотностью каркаса 85 % – наблюдалось незначительное снижение прочности и пластичности и снижение в 1,5–2 раза ударной вязкости. Это связано с тем, что при высокой степени деформации образуются большие напряжения на межфазных границах и происходит образование микротрещин. В псевдосплаве с плотностью каркаса 75 % протяженность межфазных границ железо–медь значительно больше, поэтому количество микротрещин больше и материал разрушается, а в псевдосплаве с каркасом плотностью 85 % количество микротрещин не достигает критического значения, материал не разрушается, но существенно снижается ударная вязкость, так как эта характеристика является наиболее структурно чувствительной.

Установлено, что горячая штамповка полностью исключила остаточную пористость (табл. 1) и существенно повысила механические свойства псевдосплавов (рис. 1). При повышении температуры штамповки до 950 °С прочность псевдосплавов возрастает, а при температуре 1000 °С происходит снижение прочности на 20–50 МПа в зависимости от исходной плотности каркаса.

Ударная вязкость псевдосплавов на основе сталей с исходной плотностью 80 и 85 % с повышением температуры штамповки снижается, с исходной плотностью 75 % – незначительно повышается. Это объясняется следующими изменениями структуры псевдосплавов: увеличение температуры горячей штамповки до 800–850 °С приводит к растягиванию участков медной фазы в направлении, перпендикулярном приложению нагрузки (рис. 2, *a, b*), а при 900 °С под действием пластической деформации каркаса наблюдается дробление и частичная их коагуляция, участки меди располагаются дискретно (рис. 2, *c*). При штамповке при температуре 1000 °С дискретные участки медной фазы вновь вытягиваются (рис. 2, *d*).

Т а б л и ц а 1. Влияние температуры штамповки на плотность псевдосплава, кг/м³
 T a b l e 1. Influence of the forging temperature on the density of the pseudo-alloy, kg/m³

Материал каркаса	Пористость каркаса, %	Температура штамповки, °C					
		700	750	800	850	900	950
ПК80Н4	25	7980	8030	8040	8040	8040	8040
	20	7940	7940	7960	7960	7960	7960
	15	7890	7890	7890	7910	7920	7920
ПК80Х3	25	7850	7860	7870	7890	7890	7920
	20	7840	7860	7860	7870	7870	7880
	15	7840	7840	7850	7860	7860	7860

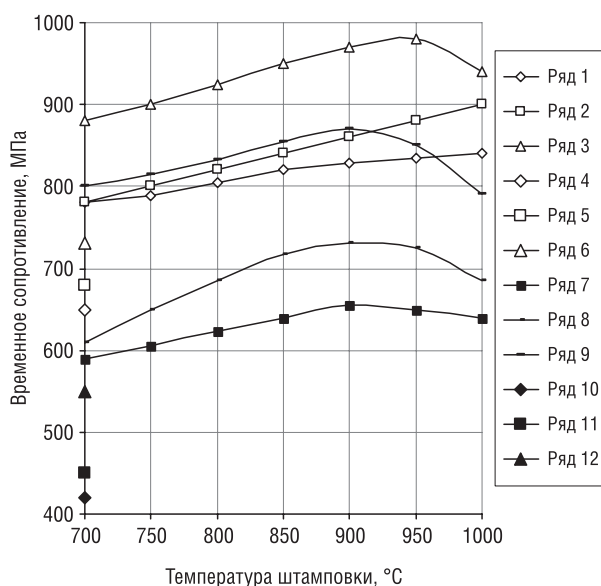


Рис. 1. Влияние температуры горячей штамповки на свойства псевдосплава, полученного инфильтрацией медью каркаса из различных сталей: ряды 1, 2, 3, 4, 5, 6 – ПК80Н4; ряды 7, 8, 9, 10, 11, 12 – ПК80Х3; ряды 4, 5, 6, 10, 11, 12 – без горячей штамповки; ряды 1, 4, 7, 10 – исходная плотность 75 %; ряды 2, 5, 8, 11 – исходная плотность 80 %; ряды 3, 6, 9, 12 – исходная плотность 85 %

Fig. 1. Influence of hot forging temperature on the properties of a pseudo-alloy obtained by copper infiltration of a skeleton made of various steels: rows 1, 2, 3, 4, 5, 6 – FeC0.8Ni4; rows 7, 8, 9, 10, 11, 12 – FeC0.8Cr3; rows 4, 5, 6, 10, 11, 12 – without hot forging; rows 1, 4, 7, 10 – density of skeleton 75 %; rows 2, 5, 8, 11 – density of skeleton 80 %; rows 3, 6, 9, 12 – density of skeleton 85 %

Такое же изменение морфологии структуры медной фазы наблюдается и в псевдосплавах с каркасом, исходная плотность которого равна 80 %.

Эффект текстурирования легкоплавкой фазы в псевдосплавах наблюдали и в [24]. Авторы в процессе исследования с помощью рентгеноструктурного анализа обнаружили, что в псевдосплавах W–Cu, W–Ni–Fe, Ag–Ni при нагружении сначала деформируются металлы с границей трированной кубической кристаллической решеткой, к которым относится медь. Происходит это

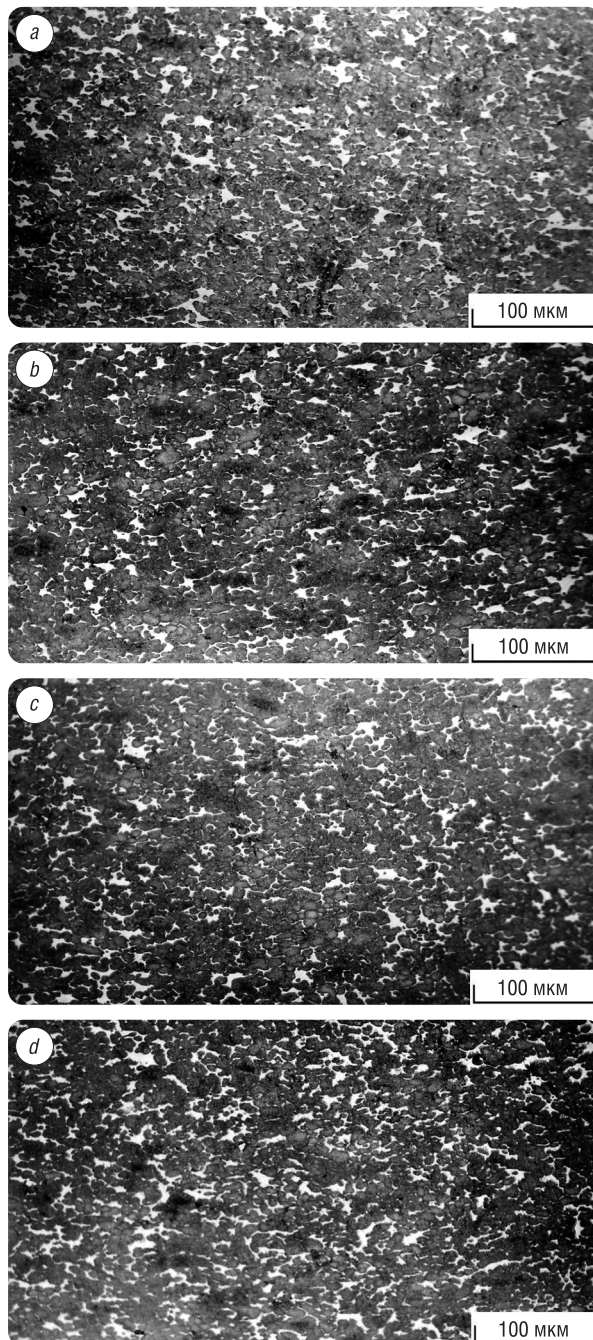


Рис. 2. Микроструктура псевдосплава с инфильтрованным медью каркасом плотностью 75 % из стали ПК80Н4, штампованного при различных температурах: a – 700 °C; b – 800 °C; c – 900 °C; d – 1000 °C

Fig. 2. Microstructure of a pseudo-alloy with a skeleton with a density of 75 % made of steel FeC0.8Ni4, infiltrated with copper, forging at different temperatures: a – 700 °C; b – 800 °C; c – 900 °C; d – 1000 °C



Рис. 3. Микроструктура штампованного при температуре 700 °С псевдосплава с инфильтрованным медью каркасом плотностью 75 % из стали ПК80Х3,

Fig. 3. Microstructure of a pseudo-alloy forged from a temperature of 700 °C with a skeleton with a density of 75 % made of FeCo.8Cr3 steel infiltrated with copper

потому, что формоизменение образца при пластической деформации определяется вязким течением и внутризерненным сдвигом, а локализация деформации у межфазной границы приводит к тому, что тугоплавкая составляющая не текстурируется. Повышение прочности межфазных и внутрифазных границ, снижение исходной пористости способствует увеличению степени текстурированности составляющих.

Свойства горячештампованных псевдосплавов с каркасом из никелевой стали выше, чем с каркасом из хромистой стали, независимо от температуры штамповки. Это связано с тем, что в структуре каркаса из хромистой стали имеют место оксиды хрома, образующиеся при нагреве под штамповку как в стальной основе, так и в медной фазе (рис. 3), в которую они выдавливаются из каркаса в процессе деформации. В результате ударная

вязкость псевдосплавов с каркасом из хромистой стали ниже, чем из никелевой стали.

Горячая штамповка обеспечила повышение на 1,5–2,0 % пластичности псевдосплавов. Относительное удлинение горячештампованных псевдосплавов с каркасом из никелевой стали с исходной плотностью 75 % составляет 2,8–4,9 %, относительное сужение – 2,9–3,6 %; с исходной плотностью 80 % – соответственно 2,0–4,1 % и 1,5–2,9 %. Относительное удлинение псевдосплава с каркасом из хромистой стали не превышает 0,5–1,5 % независимо от исходной плотности стального каркаса.

Исследование изломов псевдосплавов, штампованных при 700 °С, показало, что вследствие упрочнения каркаса при пластической деформации имеет место межзеренное разрушение преимущественно по медной фазе (рис. 4) как менее прочной. На фрактограммах выявляется ямочный характер излома (рис. 4, *a*), но ямки неглубокие, что говорит о том, что происходит упрочнение и медной фазы.

Дискретное расположение медной фазы в псевдосплавах, штампованных при высоких температурах, приводит к тому, что разрушение происходит преимущественно по межзеренным границам стального каркаса (рис. 4, *b*, 5, *b*). Это подтверждает микрорентгеноспектральный анализ (рис. 5, *c*). Текстурированность медной фазы проявляется в образовании вытянутых ямок разрушения на изломах (рис. 4, *b*).

Дискретное расположение участков медной фазы в псевдосплавах с исходной плотностью каркаса 85 % наблюдается уже при температуре штамповки 800 °С (рис. 6). В связи с этим ударная вязкость материала с повышением температуры штамповки снижается в большей степени.

Т а б л и ц а 2. Зависимость твердости (НВ) псевдосплава от температуры штамповки

Table 2. Dependence of the hardness (НВ) of the pseudo-alloy on the forging temperature

Материал каркаса	Исходная плотность, %	Температура штамповки, °С					
		700	750	800	850	900	950
ПК80Н4	75	232	243	235	230	248	252
	80	246	258	255	258	296	321
	85	267	281	289	299	311	336
ПК80Х3	75	237	252	237	296	321	352
	80	262	266	270	318	321	375
	85	266	294	299	328	352	415

Увеличение ударной вязкости псевдосплавов с каркасом плотностью 75 %, штампованных при температурах 800–850 °С, объясняется тем, что с ростом температуры штамповки повышается растворимость меди в железе и железе в меди, кроме того, медная фаза в большей степени обогащается никелем. С повышением плотности каркаса до 85 % площадь контакта между медной и стальной фазами меньше, соответственно степень диффузии меди и железа уменьшается. Повышение легированности твердого раствора железной основы и медной фазы в псевдосплавах, штампованных при высоких температурах, подтверждается также ростом их твердости (табл. 2).

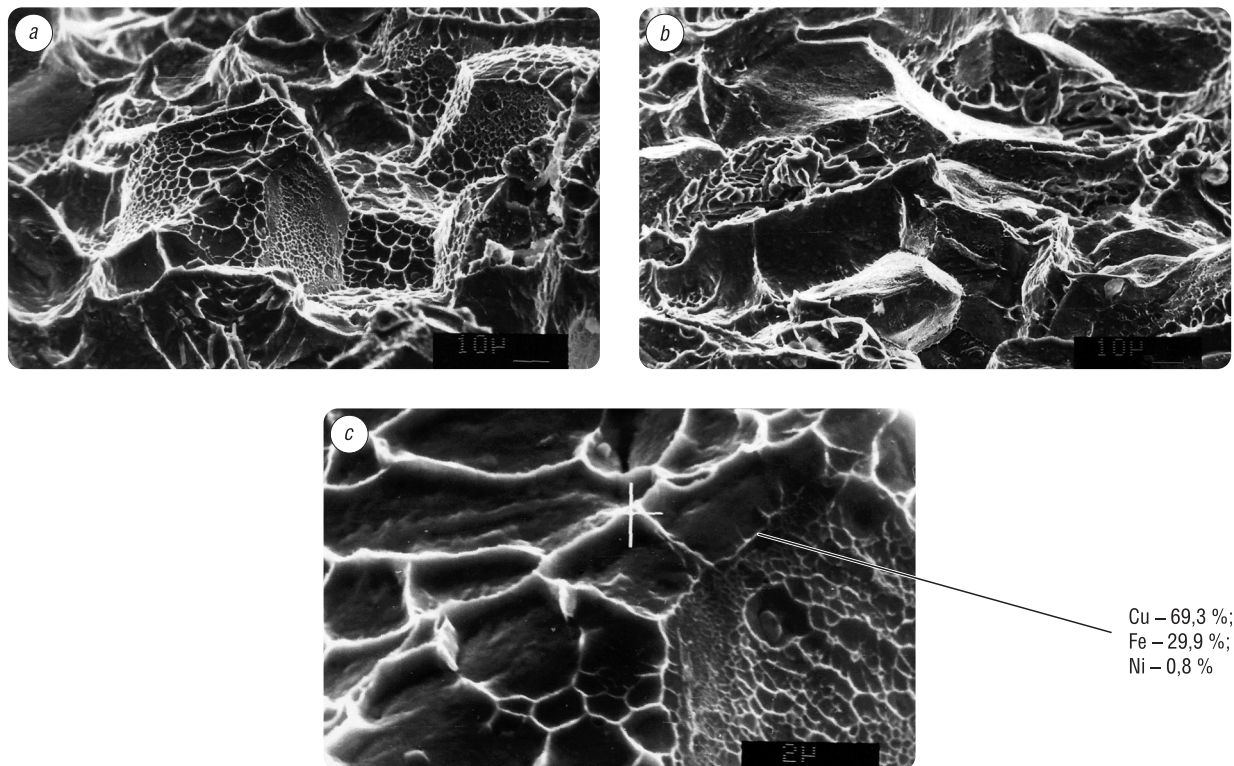


Рис. 4. Фрактограммы изломов горячештампованного псевдосплава с инфильтрированным медью каркасом плотностью 75 % из стали ПК80Н4: *a, c* – температура штамповки 700 °С; *b* – температура штамповки 900 °С

Fig. 4. Fractograms of fractures of a hot-forged pseudo-alloy with a skeleton of 75 % density made of FeC0.8Ni4 steel infiltrated with copper: *a, c* – forging temperature 700 °С; *b* – forging temperature 900 °С

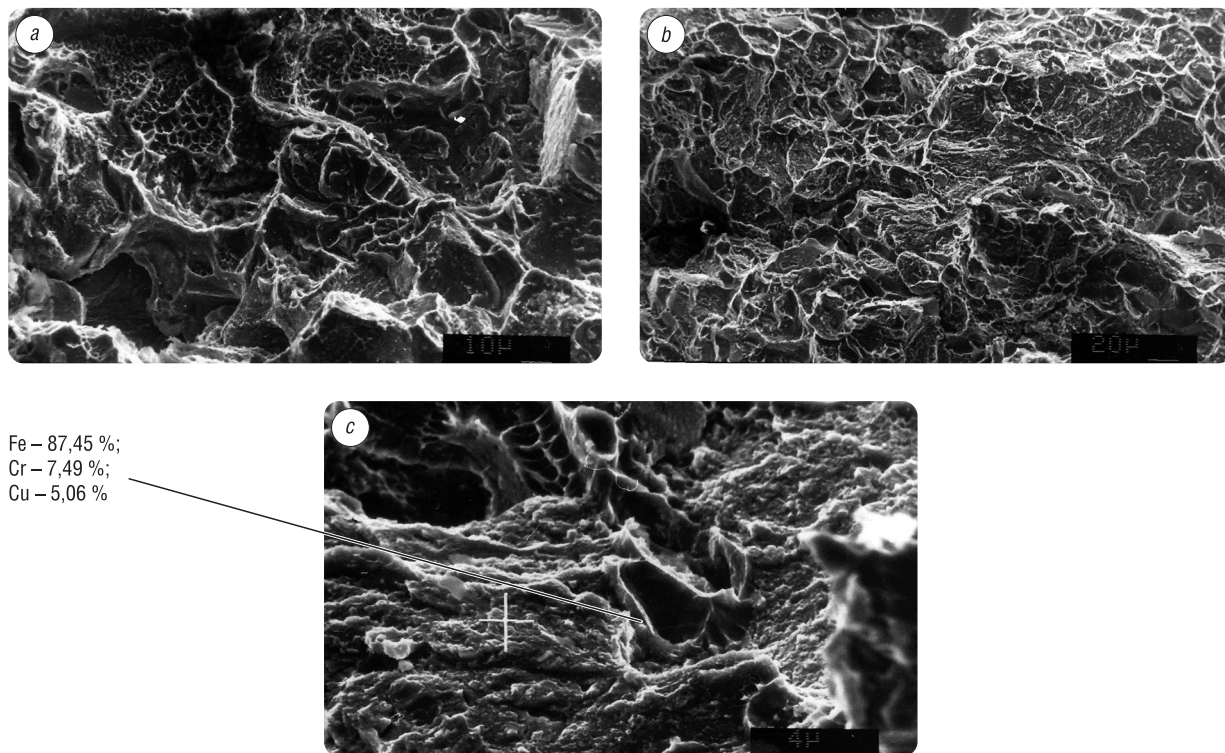


Рис. 5. Фрактограммы изломов штампованного псевдосплава с инфильтрированным медью каркасом плотностью 75 % из стали ПК80Х3: *a* – температура штамповки 700 °С; *b, c* – температура штамповки 900 °С

Fig. 5. Fractograms of fractures of a forged pseudo-alloy with a skeleton of 75 % density made of FeC0.8Cr3 steel infiltrated with copper: *a* – forging temperature 700 °С; *b, c* – forging temperature 900 °С

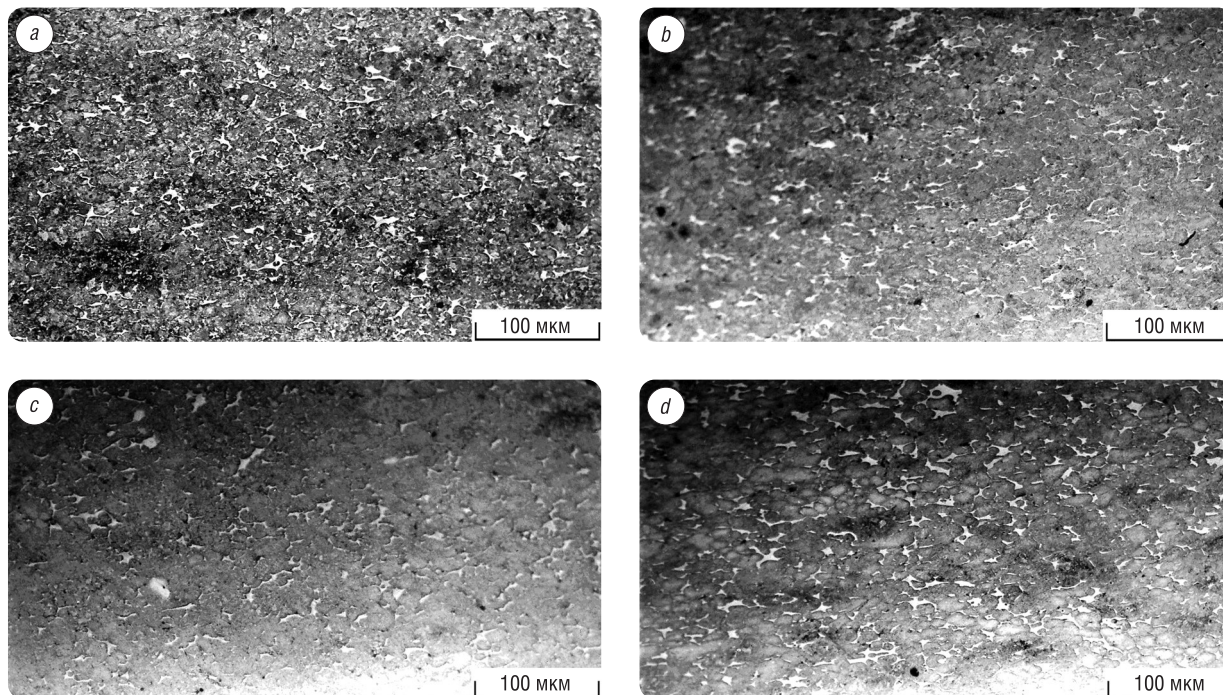


Рис. 6. Микроструктура горячештампованного псевдосплава с инфильтрированным медью каркасом плотностью 85 % из стали ПК80Н4: *a* – температура штамповки 700 °С, *b* – температура штамповки 800 °С, *c* – температура штамповки 900 °С, *d* – температура штамповки 1000 °С

Fig. 6. Microstructure of a hot-forged pseudo-alloy with a skeleton of 85 % density made of FeC0.8Ni4 steel infiltrated with copper: *a* – forging temperature 700 °C, *b* – forging temperature 800 °C, *c* – forging temperature 900 °C, *d* – forging temperature 1000 °C

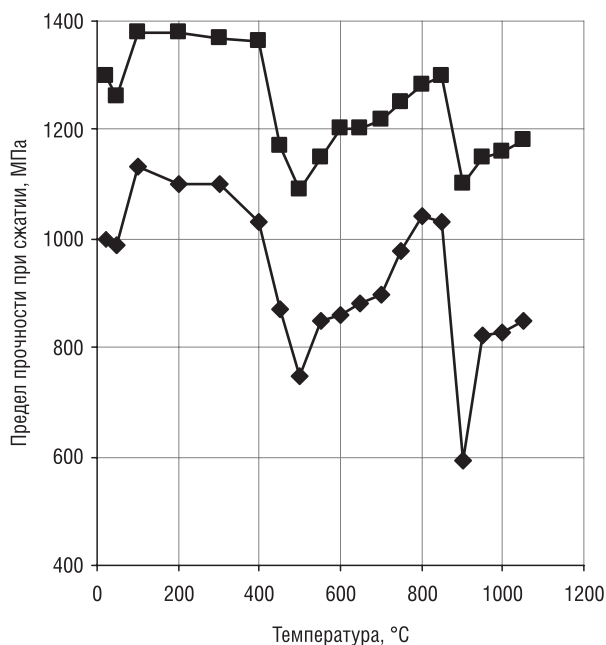


Рис. 7. Зависимость прочности при сжатии псевдосплава с каркасом из стали ПК80 от температуры штамповки: ■ – инфильтрация медью, ◆ – инфильтрация оловянной бронзой

Fig. 7. Dependence of the compressive strength of the pseudo-alloy with a skeleton made of FeC0.8 steel on the forging temperature: ■ – copper infiltration, ◆ – tin bronze infiltration

Горячая штамповка при температуре 800–850 °С позволила существенно повысить свойства псевдосплавов с каркасом из углеродистой стали. Так, временное сопротивление псевдосплава с каркасом из стали ПК80 с исходной плотностью 75 % после инфильтрации медью составляет 380 МПа, с исходной плотностью 85 % – 470 МПа, после горячей штамповки – 520 и 590 МПа соответственно. Твердость псевдосплавов повысилась на 40–60 НВ.

Из кривых зависимости предела прочности при сжатии псевдосплавов с каркасом из углеродистой стали ПК80, инфильтрированным медью и оловянистой бронзой (5 % олова) от температуры свободной осадки образцов диаметром 14 мм, высотой 22 мм, изменяемой через каждые 50 °С в интервале 20–1150 °С, видно (рис. 7), что при температуре 100–400 °С наблюдается незначительное повышение усилия разрушения, связанное с началом растворения графита в железе и образованием перлита в каркасе.

Далее при температуре 500 °С происходит снижение усилия разрушения в среднем

на 200–300 МПа, а при температурах 550–850 °С усилие разрушения медленно возрастает. Это объясняется дисперсионным твердением медной фазы и повышением легированности железного каркаса. В интервале температур 700–850 °С происходит $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение. При температуре 900 °С наблюдается резкое снижение усилия разрушения, следовательно, эта температура является оптимальной для горячей пластической деформации псевдосплава с каркасом из углеродистой стали. Таким образом, применение горячей штамповки позволяет полностью исключить пористость и существенно повысить свойства псевдосплавов.

Горячая штамповка, приводящая к возникновению макротекстуры в псевдосплавах, вызывает образование вторичной анизотропии. Уровень анизотропии свойств зависит от степени и температуры деформации.

Анизотропию свойств определяли на образцах из псевдосплава с каркасом из железа, инфильтрированным медью. Деформацию осуществляли свободной осадкой со степенью 15 %, 30 и 45 %. Для определения анизотропии свойств из заготовок вырезали образцы в трех взаимно перпендикулярных направлениях для испытания на растяжение, изгиб и ударную вязкость.

В качестве каркаса псевдосплава использовали железо, чтобы исключить влияние гетерогенности структуры каркаса, неизбежно возникающее в порошковых углеродистых и легированных сталях, а также для получения более высоких характеристик пластичности и вязкости по сравнению с псевдосплавами на основе углеродистых и легированных сталей.

Установлено, что после горячей штамповки анизотропия свойств в большей степени, так же как и в исходном состоянии, проявляется в пластичности (рис. 8) и ударной вязкости (рис. 9).

Уровень анизотропии относительного удлинения при деформации со степенью 15 % в материалах с исходной плотностью каркаса 75 % составляет 51 %, с исходной плотностью каркаса 85 % – 61 %; относительного сужения – 47 и 44 % соответственно. Повышение степени деформации до 30 % приводит к незначительному (до 5 %) возрастанию анизотропии пластичности.

Степень анизотропии прочности псевдосплава невелика при деформации 15 % и составляет 14 % при плотности каркаса 75 % и 9 % – при плотности 85 %. При степени деформации 30 % уровень анизотропии повышается и равен соответственно 20 и 14 % (рис. 10). При повышении температуры горячей штамповки до 900 °С существенных изменений в степени анизотропии не наблюдается (см. рис. 8, *b*; 10, *b*).

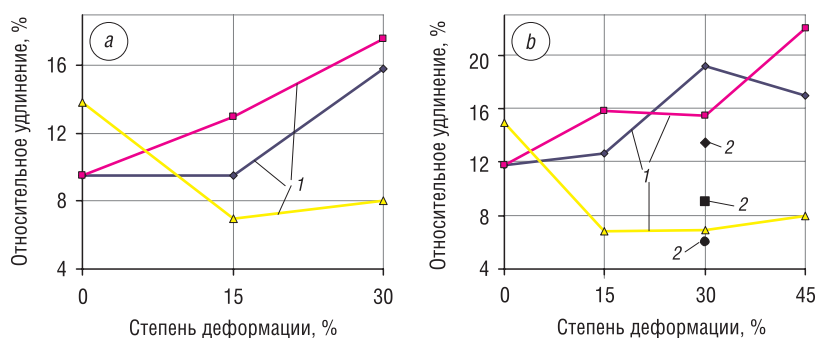


Рис. 8. Влияние степени деформации и температуры горячей штамповки на относительное удлинение псевдосплава с каркасом различной плотности из железа, инфильтрированным медью, в трех взаимно-перпендикулярных направлениях: *a* – плотность каркаса 75 %, температура штамповки 700 °С; *b* – плотность каркаса 85 %, 1 – температура штамповки 700 °С, 2 – температура штамповки 900 °С

Fig. 8. Influence of the degree of deformation and temperature of hot forging on the elongation of a pseudo-alloy with a skeleton of different density made of iron infiltrated with copper, in three mutually perpendicular directions: *a* – skeleton density 75 %, forging temperature 700 °С; *b* – skeleton density 85 %, 1 – forging temperature 700 °С, 2 – forging temperature 900 °С

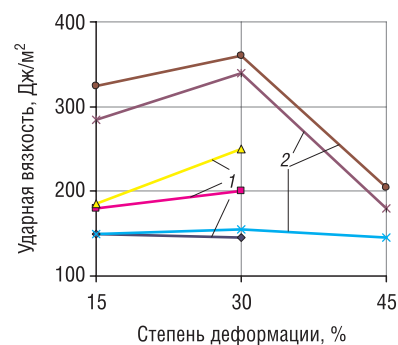


Рис. 9. Влияние степени деформации при штамповке при 700 °С на ударную вязкость псевдосплава с каркасом различной плотности из железа, инфильтрированным медью: 1 – плотность каркаса 75 %, 2 – плотность каркаса 85 %

Fig. 9. Influence of the degree of deformation when forging at 700 °С on the impact toughness of a pseudo-alloy with a skeleton of different density made of iron infiltrated with copper: 1 – skeleton density 75 %, 2 – skeleton density 85 %

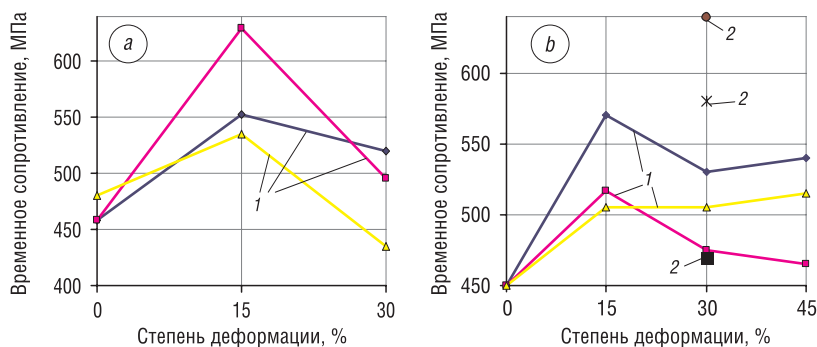


Рис. 10. Влияние степени и температуры горячей штамповки на временное сопротивление псевдосплава с инфильтрованным медью каркасом различной плотности из железа: *a* – плотность каркаса 75 %, температура штамповки 700 °С; *b* – плотность каркаса 85 %, 1 – температура штамповки 700 °С, 2 – температура штамповки 900 °С

Fig. 10. Influence of the degree and temperature of hot forging on the tensile strength of a pseudo-alloy with a skeleton of different density made of iron infiltrated with copper: *a* – skeleton density 75 %, forging temperature 700 °С; *b* – skeleton density 85 %, 1 – forging temperature 700 °С, 2 – forging temperature 900 °С

Закключение. Исследовано влияние режимов пластической деформации псевдосплавов сталь – медный сплав, получаемых инфильтрацией, на их структуру, механические свойства и анизотропию свойств. Установлено, что горячая штамповка псевдосплавов при температурах 700–950 °С обеспечивает повышение прочности в 1,5–3 раза, ударной вязкости – в 1,5–2,5 раза, пластичности – на 1,5–2 %, а при 1100–1150 °С (выше температуры плавления меди) приводит к растрескиванию материала, так как медная фаза в псевдосплаве ведет себя как несжимаемая жидкость.

Определено, что из-за наличия оксидов хрома как в каркасе из стали, легированной хромом, образующихся при нагреве под штамповку, так и в инфильтрате вследствие выдавливания оксидов в медную фазу в процессе деформации свойства псевдосплавов ниже, чем с каркасом из стали, легированной никелем.

Показано, что морфология медной фазы в псевдосплаве зависит от температуры деформации. Установлено образование макротекстуры в псевдосплавах после горячей штамповки, что приводит к вторичной анизотропии свойств, уровень которой определяется степенью деформации и температурой, но не превышает 15–20 %. Построена деформационная кривая псевдосплава, выявившая, что оптимальной температурой штамповки является 700–900 °С в зависимости от состава псевдосплава, предельная степень деформации псевдосплавов при горячей штамповке составляет 65 %. Установлено, что при повышении степени деформации происходит образование микротрещин на границе железной и медной фаз, что обуславливает снижение прочности, пластичности и в 1,5–2 раза ударной вязкости псевдосплавов с содержанием медной фазы 15 % и разрушение псевдосплавов с содержанием медной фазы 25 %, в которых протяженность межфазных железомедных границ значительно больше.

Список использованных источников

1. Трибология: исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / под ред. А.В. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон Пресс, 1993. – 454 с.
2. Сорокин, Г.М. Проблемы технического обновления различных отраслей машиностроения / Г.М. Сорокин // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, №3. – С. 322–331.
3. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин / Д.Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2002. – 626 с.
4. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
5. Триботехническое материаловедение и триботехнология / Н.Е. Денисова [и др.]. – Пенза: ПГУ, 2006. – 257 с.
6. Тучинский, Л.И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки / Л.И. Тучинский. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.

7. Швецова, Е. М. Классификация видов разрушения поверхностей деталей машин в условиях сухого и гранично-го трения / Е. М. Швецова, И. В. Крагельский // Трение и износ в машинах. – М.: АН СССР, 1953. – Вып. 8. – С. 16–38.
8. Шатт, В. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / В. Шатт. – М.: Металлургия, 1983. – 519 с.
9. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий / Ю. Г. Дорофеев [и др.]. – М.: Металлургия, 1990. – 206 с.
10. Кун, Х. А. Основные принципы штамповки порошковых заготовок / Х. А. Кун // Порошковая металлургия материалов специального назначения / под ред. Д. Барка, В. Вейса. – М.: Металлургия, 1977. – С. 143–158.
11. Антес, Х. В. Технология изготовления и свойства порошковых поковок / Х. В. Антес // Порошковая металлургия материалов специального назначения / под ред. Д. Барка, В. Вейса. – М.: Металлургия, 1977. – С. 159–197.
12. Бокштигель, Г. Некоторые технологические вопросы горячей деформации порошковых заготовок / Г. Бокштигель // Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск, 1977. – Вып. 1. – С. 75–81.
13. Sjöberg, G. Die-Filling and Densification in Hot Extrusion Forging of Porous Performs / G. Sjöberg, V. Mironov, H. E. Fischmeister // Powder Metallurgy Int. – 1977. – Vol. 9, №4. – P. 160–163.
14. Дорофеев, Ю. Г. Особенности деформации и трещинообразования нагретых цилиндрических порошковых заготовок / Ю. Г. Дорофеев, В. В. Синельщиков // Порошковая металлургия. – 1980. – № 1. – С. 25–30.
15. Друянов, Б. Ф. Исследование процесса экструзии пористого материала / Б. Ф. Друянов, А. Р. Пирумов // Вестн. машиностроения. – 1980. – № 9. – С. 61–62.
16. Дорофеев, Ю. Г. Особенности уплотнения порошковых материалов при динамическом горячем прессовании / Ю. Г. Дорофеев // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1985. – С. 136–145.
17. Oh, Hung-Kuk. A study of the extrusion of sintered porous metal / Hung-Kuk Oh, Jeong-Keun Lee // J. Mech. Work. Technol. – 1985. – Vol. 11, № 1. – P. 53–69. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(85\)90112-3](https://doi.org/10.1016/0378-3804(85)90112-3)
18. Срачивание на контактных поверхностях при различных технологических вариантах горячей обработки давлением порошковых материалов / Ю. Г. Дорофеев [и др.] // Порошковая металлургия. – 1986. – № 10. – С. 31–34.
19. Баглюк, Г. А. Развитие работ в области горячей штамповки пористых порошковых заготовок / Г. А. Баглюк, Г. Е. Мажарова, Л. А. Позняк. – Киев: ИПМ АН УССР, 1986. – 27 с.
20. Павлов, В. А. Влияние горячей деформации на формирование структуры и свойств порошковых металлов / В. А. Павлов, М. И. Носенко // Порошковая металлургия. – 1988. – № 2. – С. 16–20.
21. Павлов, В. А. Исследование горячей деформации и уплотнения порошковых металлов / В. А. Павлов, М. И. Носенко // Порошковая металлургия. – 1988. – № 1. – С. 1–6.
22. Hendrickson, A. A. Impact forging of sintered steel performs / A. A. Hendrickson, P. M. Machmeier, D. W. Smith // Powder Metallurgy. – 2000. – Vol. 43, № 4. – P. 327–344. <https://doi.org/10.1179/003258900666050>
23. Савицкий, А. П. Жидкофазное спекание систем с взаимодействующими компонентами / А. П. Савицкий. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 181 с.
24. Особенности текстурирования при холодной прокатке псевдосплавов / Р. В. Минакова [и др.] // Порошковая металлургия. – 2000. – № 1–2. – С. 88–96.

References

1. Bely A. V., Ludema K., Myshkin N. K. (eds.) *Tribology: Research and Applications: Experience of the USA and CIS Countries*. Moscow, Mashinostroenie Publ.; New York: Allerton Press, 1993. 454 p. (in Russian).
2. Sorokin G. M. Problems of technical renewal of various branches of mechanical engineering. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2001, vol. 22, no. 3, pp. 322–331 (in Russian).
3. Garkunov D. N. *Tribotechnics. Design, Manufacture and Operation of Machines*. Moscow, Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, 2002. 626 p. (in Russian).
4. Chichinadze A. V., Berliner E. M., Brown E. D. *Friction, Wear and Lubrication (Tribology and Tribotechnics)*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 576 p. (in Russian).
5. Denisova N. E., Shorin V. A. *Tribotechnical Materials Science and Tribotechnology*. Penza, Penza State University, 2006. 257 p. (in Russian).
6. Tuchinsky L. I. *Composite Materials Obtained by the Impregnation Method*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 208 p. (in Russian).
7. Shvetsova E. M., Kragelsky I. V. Classification of types of destruction of surfaces of machine parts in conditions of dry and boundary friction. *Trenie i iznos v mashinakh* [Friction and Wear in Machines]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1953, issue 8, pp. 16–38 (in Russian).
8. Shutt V. *Powder Metallurgy. Sintered and Composite Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 519 p. (in Russian).
9. Dorofeev Yu. G., Hasanov B. G. *Industrial Technology of Hot Pressing of Powder Products*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 206 p. (in Russian).
10. Kuhn H. A. Basic Principles of Stamping Powder Blanks. Bark D., Veis V. (eds.) *Powder Metallurgy of Special-Purpose Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, pp. 143–158 (in Russian).
11. Antes H. V. Manufacturing technology and properties of powder forgings. Bark D., Veis V. (eds.) *Powder Metallurgy of Special-Purpose Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, pp. 159–197 (in Russian).
12. Bokshigel G. Some technological issues of hot deformation of powder blanks. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii mezvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, 1977, issue 1, pp. 75–81 (in Russian).

13. Sjöberg G., Mironov V., Fischmeister H.E. Die-Filling and Densification in Hot Extrusion Forging of Porous Performs. *Powder Metallurgy International*, 1977, vol. 9, no. 4, pp. 160–163.
14. Dorofeev Yu. G., Sinelshchikov V. V. Deformation and cracking behavior of preheated cylindrical powder blanks. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1980, vol. 19, no. 1, pp. 20–23. <https://doi.org/10.1007/bf00798156>
15. Druyanov B. F., Pirumov A. R. Investigation of the process of extrusion of porous material. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1980, no. 9, pp. 61–62 (in Russian).
16. Dorofeev Yu. G. Features of compaction of powder materials during dynamic hot pressing. *Rheological Models and Processes of Deformation of Porous Powder and Composite Materials*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985, pp. 136–145 (in Russian).
17. Hung-Kuk Oh, Lee Jeong-Keun. A study of the extrusion of sintered porous metal. *Journal of Mechanical Working Technology*, 1985, vol. 11, no. 1, pp. 53–69. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(85\)90112-3](https://doi.org/10.1016/0378-3804(85)90112-3)
18. Dorofeev Yu. G., Dorofeev V. Yu., Egorov S. N., Gorshkov S. A. Welding on contact surfaces in different technological variants of the hot plastic working of P/M materials. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1986, vol. 25, no. 10, pp. 813–816. <https://doi.org/10.1007/bf00801427>
19. Baglyuk G. A., Mazharova G. E., Poznyak L. A. *Development of Works in the Field of Hot Stamping of Porous Powder Blanks*. Kiev, Institute of Problems of Materials Science of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1986. 27 p. (in Russian).
20. Pavlov V. A., Nosenko M. I. Effect of hot working on the formation of structure and properties in sintered metals. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1988, no. 2, pp. 103–107. <https://doi.org/10.1007/bf00802731>
21. Pavlov V. A., Nosenko M. I. Research of hot deformation and compaction of powder metals. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 1988, vol. 27, no. 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1007/bf00799727>
22. Hendrickson A. A., Machmeier P. M., Smith D. W. Impact forging of sintered steel performs. *Powder Metallurgy*, 2000, vol. 43, no. 4, pp. 327–344. <https://doi.org/10.1179/003258900666050>,
23. Savitsky A. P. *Liquid Phase Sintering of Systems with Interacting Components*. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian branch, 1991. 181 p. (in Russian).
24. Minakova R. V., Rachek A. P., Kryachko L. A., Kresanova A. P., Zatovsky V. G. Features of texturing during cold rolling of pseudo-alloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2000, vol. 39, no. 1–2, pp. 78–84. <https://doi.org/10.1007/bf02677447>

Информация об авторе

Дьячкова Лариса Николаевна – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-1850-6221>. E-mail: dyachkova@tut.by

Information about the author

Larisa N. Dyachkova – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory, Academician O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-1850-6221>. E-mail: dyachkova@tut.by