

К вопросу применимости концепции активированного спекания, предложенной Г.В. Самсоновым, при изучении процессов деформации порошковых материалов

© 2018 г. **В.Ю. Дорофеев, А.Н. Свиридова, Х.С. Кочкарова**

Южно-Российский государственный политехнический университет (ЮРГПУ (НПИ)) им. М.И. Платова,
г. Новочеркасск

Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия (СевКавГГТА), г. Черкесск

Статья поступила в редакцию 09.08.18 г., подписана в печать 13.08.18 г.

Приводятся некоторые воспоминания Ю.Г. Дорофеева о совместной работе и встречах с выдающимся ученым-материаловедом Г.В. Самсоновым. Особое значение имели встречи в Югославии, где Г.В. Самсонов и М.М. Ристич совместно с другими всемирно известными учеными создали Международный институт науки о спекании. В последние годы жизни Г.В. Самсонов предложил концепцию активирования спекания добавками, являющимися акцепторами электронов и вносящими дополнительную долю ионной связи в матричный материал. Рассматривается возможность применения указанной концепции при разработке добавок-активаторов, снижающих энергию активации пластической деформации порошковых материалов на железной основе. Активация спекания в процессе формирования стабильных электронных конфигураций может осуществляться за счет: 1) ускорения зернограницной гетеродиффузии материала матрицы в присутствии сегрегаций фазы, содержащей активирующую микродобавку (система W–Ni); 2) интенсификации усадки при пластическом течении частиц материала матрицы, протеканию которого способствует формирование диффузионной пористости в частицах присадки в результате преимущественной диффузии атомов присадки в частицы основного металла (системы Fe–Ni, Fe–Co, Fe–Mn); 3) увеличения коэффициента самодиффузии атомов основного металла за счет расширения области существования менее плотноупакованной кристаллической решетки (α -фазы) при растворении активирующей добавки (система Fe–Mo). Приводится анализ имеющейся информации, касающейся перспектив использования марганца и хрома в качестве добавок – активаторов уплотнения. Снижение энергии активации уплотнения порошковых материалов на основе железа может быть обеспечено при введении добавок марганца. При этом перспективно применение технологии диффузионного насыщения. Вопрос об использовании хрома в качестве активатора не имеет однозначного ответа и предполагает необходимость дополнительного изучения.

Ключевые слова: Самсонов Г.В., активированное спекание, концепция, доноры и акцепторы электронов, железо, хром, марганец, молибден, вольфрам, никель, горячее прессование, деформация, пористые заготовки, энергия активации, уплотнение, консолидация, диффузия, пластическое течение, оксиды, микродобавки.

Дорофеев В.Ю. – докт. техн. наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», ЮРГПУ (НПИ) (346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132). E-mail: dvyu56.56@mail.ru.

Свиридова А.Н. – ассистент кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы», ЮРГПУ (НПИ). E-mail: anysviridova@yandex.ru.

Кочкарова Х.С. – ст. препод. кафедры «Технологические машины и переработка материалов», СевКавГГТА (369000, Карачаево-Черкесская респ., г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36). E-mail: kochkarova-h@rambler.ru.

Для цитирования: Дорофеев В.Ю., Свиридова А.Н., Кочкарова Х.С. К вопросу применимости концепции активированного спекания, предложенной Г.В. Самсоновым, при изучении процессов деформации порошковых материалов.

Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. No. 4. С. 6–14.

DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-6-14.

Dorofeyev V.Yu., Sviridova A.N., Kochkarova Kh.S.

On the question of the applicability of G.V. Samsonov's activated sintering concept in studying the processes of powder material deformation

Some Yu.G. Dorofeev's memoirs about joint work and meetings with outstanding materials science expert G.V. Samsonov are given. Meetings in Yugoslavia were of particular importance where G.V. Samsonov and M.M. Ristić together with other world-famous scientists created the International Institute for the Science of Sintering. In the last years of his life, G.V. Samsonov proposed the concept of sintering activation by additives that act as electron acceptors and additionally contribute to the ionic bond in the matrix material. The paper considers the possibility of using this concept in the development of activating additives that reduce the

activation energy of the plastic deformation of iron-based powder materials. Sintering activation when forming stable electronic configurations can be accomplished by: 1) accelerating the grain-boundary heterodiffusion of the matrix material in the presence of phase segregations containing an activating microadditive (W–Ni system); 2) intensifying shrinkage during the plastic flow of matrix material particles facilitated by diffusion porosity formed in the additive particles as a result of predominant additive atom diffusion into base metal particles (Fe–Ni, Fe–Co, Fe–Mn systems); 3) increasing the self-diffusion coefficient of base metal atoms due to the expanded area of a less close-packed crystal lattice (α phase) upon activating additive dissolution (Fe–Mo system). The article reviews the information available on the prospects for using manganese and chromium as compaction activating additives. The compaction activation energy of iron-based powder materials can be reduced by introducing manganese additives. At the same time, the use of diffusion saturation technology is promising. The question of using chromium as an activator does not have an unambiguous answer and suggests the need for further study.

Keywords: Samsonov G.V., activated sintering, concept, electron donors and acceptors, iron, chromium, manganese, molybdenum, tungsten, nickel, hot pressing, deformation, porous preforms, activation energy, compaction, consolidation, diffusion, plastic flow, oxides, microadditives.

Dorofeyev V.Yu. – Dr. Sci. (Tech.), professor of the mechanical engineering Department, Platov South-Russian State Polytechnic University (PSRSPU (NPI)) (346428, Russia, Rostov region, Novocherkassk, Prosveshcheniya str., 132). E-mail: dvuyu56.56@mail.ru.

Sviridova A.N. – assistant of the Department of automobiles and transport-technological complexes, PSRSPU (NPI). E-mail: anysviridova@yandex.ru.

Kochkarova Kh.S. – senior lecturer of the Department of technological machines and processing of materials, North Caucasian State Humanitarian Technological Academy (369000, Russia, Karachay-Cherkessia, Cherkessk, Stavropolskaya str., 36). E-mail: kochkarova-h@rambler.ru.

Citation: Dorofeyev V.Yu., Sviridova A.N., Kochkarova Kh.S. On the question of the applicability of G.V. Samsonov's activated sintering concept in studying the processes of powder material deformation. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2018. No. 4. P. 6–14 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-4-6-14.

Можно по-разному относиться к конфигурационной модели электронного строения, но не может не поражать масштаб замысла — стремление создать универсальную теорию для интерпретации и предсказания свойств и структуры металлов (элементов), сплавов и соединений.
Р.А. Андриевский [1]

Немного личного... Из воспоминаний Ю.Г. Дорофеева о совместной работе и встречах с Г.В. Самсоновым

На письменном столе — свежий номер журнала «Порошковая металлургия», посвященный 100-летию со дня рождения Григория Валентиновича Самсонова. С первых лет существования этого журнала Г.В. Самсонов был членом редколлегии и одним из самых активных его авторов. Ученики и коллеги Григория Валентиновича нашли верные слова и эпитеты, характеризующие его вклад в современное материаловедение тугоплавких соединений [2, 3]. Авторам настоящего сообщения посчастливилось слышать рассказы Юрия Григорьевича Дорофеева о встречах и совместной работе с Г.В. Самсоновым. Считаю уместным привести здесь некоторую часть из этих воспоминаний, тем более если учесть, что живых свидетелей становится все меньше, а представление событий в изложении не от первого лица зачастую грешит некоторым искажением.

Впервые Ю.Г. Дорофеев и Г.В. Самсонов встречались в Киеве в Институте проблем материаловедения (в настоящее время — ИПМ им. И.Н. Францевича НАН Украины) на рубеже 50-х — 60-х годов прошлого столетия. В то время Ю.Г. Дорофеев вместе с коллегами из ИПМ участвовал в подготовке постановления Совета министров и Госплана УССР по внедрению метода горячего брикетирования металлической стружки под молотом, разработанного в Новочеркасском политехническом институте (НПИ). Г.В. Самсонов — на тот момент уже всемирно известный и авторитетный ученый — поддержал работы молодого инженера из Новочеркасска — небольшого провинциального городка, затерянного в донских степях. Эту поддержку Ю.Г. Дорофеев ощущал вплоть до момента кончины Григория Валентиновича и даже после... Поздравительная открытка с Новым — 1976-м — годом от Г.В. Самсонова пришла уже после его смерти. Юрий Григорьевич высоко ценил последнюю полученную им при жизни награду им. Г.В. Самсонова, присужденную ему по решению Украинского материаловедческого общества в феврале 2014 г.

Из воспоминаний супругов Ю.Г. Дорофеева и К.Н. Дорофеевой¹:

... 1968-й год. Концертный зал Киевского политехнического института. В торжественной обстановке отмечается 50-летие Г.В. Самсонова. Произносятся «дежурные» речи. Наконец слово для поздравления предоставляется мне. Когда я шел к трибуне, слышал шепоток: «Такой молодой — уже доктор наук?». Я поздравил Самсонова, а в конце сказал, что привез донские сувениры, которые вручу после торжественного мероприятия. Самсонов с нетерпением ожидал окончания заседания, а потом мы встретились...

... Начало 70-х годов. Херцег-Нови, Югославия. Кафе на берегу Адриатического моря. За столиком мы сидим вдвоем с Самсоновым. К Самсонову подходит представитель крупнейшего западного издательства с предложением от владельца принять участие в переговорах в Италии. С этой целью владелец издательства прислал самолет. Однако Григорий Валентинович отказался, сославшись на то, что он разговаривает с другом — Дорофеевым Ю.Г. — и эта беседа имеет для него большое значение...

... Тема войны так или иначе обсуждалась при встречах. Г.В. Самсонов говорил: «Я всю войну прополз на брюхе и не верю ни Симонову, ни другим штатным писателям»...

... Самсонов любил Киев и говорил о том, что нигде так не цветут каштаны, как возле днепровских круч. Однако, будучи в Москве, не раз повторял: «Я москвич, мне здесь каждый камешек знаком, и меня здесь многие знают. После того, как я был в окружении, меня долго не оставляли в покое соответствующие органы. Когда водили на допрос здесь, в Москве, меня могли узнать на улице, а это было чревато дополнительными проблемами»...

... Самсонов говорил: «Бойтесь мужчину непьющего, он — либо картежник, либо любитель женщин. Знаете, я в молодости играл в карты с двумя бывшими белогвардейцами. Я знаю такие игры, в которые сейчас никто не играет. Но время шло, и в какой-то момент я подумал: «Белогвардейцы умрут, а я что буду делать?». И занялся наукой»...

Ю.Г. Дорофеев отмечал [4]: «Воспоминания о встречах с Григорием Валентиновичем, наряду с чувством неизменной признательности к нему за ту пользу, которую они принесли, всегда были приятны. Он был остроумным собеседником, доброжелательным и отзывчивым товарищем».

¹ Авторы выражают благодарность вдове Ю.Г. Дорофеева Клавдии Николаевне за помощь при написании настоящей статьи. Она была участником и свидетелем многих встреч Г.В. Самсонова и Ю.Г. Дорофеева.



Югославия, начало 1970-х годов
Слева направо: Г.В. Самсонов, М.М. Ристич, Ю.Г. Дорофеев

Г.В. Самсонов привлек Ю.Г. Дорофеева к работе международной группы по изучению спекания, которая впоследствии трансформировалась в Международный институт науки о спекании (г. Белград, Сербия). В чем заключалась общность научных интересов этих ученых? Основная часть работ Г.В. Самсонова была связана с синтезом тугоплавких соединений [5, 6]. Исследования Ю.Г. Дорофеева посвящены, главным образом, порошkovому материаловедению железа и его сплавов. Представляется, что точка соприкосновения научных интересов ученых лежала в области изучения горячего прессования порошков или пористых заготовок.

Г.В. Самсонов рассматривал горячее прессование как разновидность спекания, активированного внешним механическим воздействием. В ряде работ была показана применимость разработанной им электронной теории к описанию процессов консолидации порошковых материалов — прессованию и спеканию [7, 8]. Подчеркивалось, что эти процессы нельзя рассматривать отдельно, поскольку они представляют собой составляющие одного сложного и уникального процесса консолидации.

При изучении различных аспектов структурообразования горячедеформированных порошковых материалов (ГДПМ) Ю.Г. Дорофеев столкнулся с необходимостью изучения вопросов контактного взаимодействия на межчастичных поверхностях. При описании этих процессов было предложено использовать термин «межчастичное сращивание», который закрепился в трудах ново-

черкасской школы порошкови́ков [9]. Г.В. Самсонов призывал перейти при рассмотрении многих материаловедческих вопросов, в частности при изучении спекания и сращивания, от атомного к наиболее глубокому уровню структурной иерархии — электронному [10]. Однако эта задача остается по настоящее время невыполненной.

На целесообразность использования электронной теории Г.В. Самсонова при изучении процессов межчастичного сращивания и трения авторы указывали ранее [11]. В одной из последних своих неопубликованных работ он отмечал, что схватывание частиц оксидов при прессовании обусловлено обменом электронами между атомами этих частиц. Этот обмен тем интенсивнее, чем меньше локализация валентных электронов у остовов атомов кислорода и оксидообразующего элемента, т.е., в конечном счете, чем больше доля ионной связи в оксиде. С этих же позиций Г.В. Самсоновым была предложена концепция активирования спекания добавками, являющимися акцепторами электронов и вносящими дополнительную долю ионной связи в матричный материал [12].

И в первые, и в последующие после смерти Григория Валентиновича годы интерес ученых к теме активированного спекания не снижался. Показательно в этом плане еще одно воспоминание Ю.Г. Дорофеева:

... В 1984-м году проходила очередная конференция по спеканию в Югославии. Утром мы пошли вместе с Ю.Л. Красулиным на море купаться. Поплавали. Красулин мне говорит: «Вы знаете, я всю ночь думал о том, что такое активированное спекание. Я нашел ответ. Я Вам расскажу за завтраком». Однако когда мы пришли и сели за столик завтракать, Сергей Сергеевич Кипарисов (который был очень наблюдательным) спросил Красулина: «Что с тобой? Ты изменился в лице!». Это было начало серьезной болезни Красулина, от которой он не оправился.... А разговор на пляже по поводу активированного спекания продолжения не имел...

Авторам представляется целесообразным рассмотреть возможность применения концепции активированного спекания Г.В. Самсонова к поиску добавок, снижающих энергию активации пластической деформации. Правомерность такого подхода определяется упомянутой выше общностью процессов горячего прессования и спекания. Энергия активации процесса усадки при спекании и энергия активации горячей деформации близки к энергии активации самодиффузии основно-

го компонента матрицы, поскольку эти процессы контролируются механизмом высокотемпературной ползучести [13, 14].

Использование теории создания стабильных электронных конфигураций при выборе добавок, улучшающих деформируемость порошковых материалов

В последние годы наблюдается рост количества исследований, посвященных изучению возможности применения хрома и марганца в качестве легирующих элементов порошковых сталей [15, 16]. Это связано с высокой стоимостью традиционно используемых легирующих элементов порошковых сталей — Ni, Mo, Cu. Кроме того, с 01.06.2007 г. введен в действие регламент Евросоюза № 1907.2006 (REACH), который ограничивает применение канцерогенного никеля в порошковых изделиях [17]. Хром и марганец рассматриваются как перспективная альтернатива никелю, однако эти элементы образуют трудновосстановимые оксиды, что ограничивает область их использования и накладывает особые требования к качеству защитной атмосферы при спекании. При изготовлении тяжело нагруженных деталей двигателя, в частности скобы клапана, рекомендуется применять вакуумное спекание заготовок на основе легированных хромом железных порошков с последующей цементацией при низком давлении смеси ацетилена и азота [15].

Помимо окисления при спекании марганецсодержащих порошковых заготовок возможна сублимация марганца. С целью усиления влияния сублимации на процесс спекания и легирования марганец следует вводить в наивысшей концентрации (или в чистом виде) [18]. В этом случае над свободной поверхностью спекаемого образца происходит взаимодействие выделяющихся паров марганца и кислорода защитной среды. Для снижения потерь марганца рекомендуется при спекании применять защитные среды с невысокой степенью очистки [19].

Тенденция расширения номенклатуры изделий, выпускаемых с использованием технологии порошковой металлургии, обуславливает актуальность разработки процессов получения высоколегированных сталей (в частности, быстрорежущих), которые относятся к классу труднодеформируе-

мых [20]. Изготовление и эксплуатация деталей из таких сталей сопряжены с риском образования трещин [21]. Изложенные выше обстоятельства свидетельствуют о необходимости разработки эффективных методов повышения деформируемости порошковых материалов. Указанная проблема имеет важное самостоятельное значение, хотя в некоторых аспектах примыкает к проблеме межчастичного сращивания.

Развитием идей Г.В. Самсонова явилась работа Р.М. Германа, в которой была предложена количественная теория диффузионно активированного спекания [22]. Исключив из рассмотрения эффекты активации спекания, связанные с измельчением частиц, основное внимание автор уделит явлениям, связанным с изменением поверхностных свойств, модифицированием границ зерен, а также с обеспечением действия скрытых (потенциальных) механизмов массопереноса.

По мнению автора [22], ускорение массопереноса за счет увеличения зернограницной диффузии при введении модифицирующих добавок является главным механизмом активации спекания. В качестве примера рассмотрен хорошо изученный на тот момент эффект активации спекания вольфрама при введении никеля [7]. В этом случае имеет место преимущественная диффузия вольфрама в никель, что и является одной из главных предпосылок активации спекания. Уплотнение активируется в результате ускорения зернограницной гетеродиффузии вольфрама за счет присутствия сегрегаций фазы, обогащенной никелем. Для обеспечения оптимальной усадки никель должен вводиться в качестве микродобавки (~0,1 мас.%), которую необходимо осадить на частицах порошка основы в виде монослоя.

Из обобщения экспериментальных и теоретических данных сформулировано требование о необходимости различия структур электронных оболочек материалов основы и активирующей добавки. В качестве второго требования отмечается необходимость различия температур плавления активатора и материала основы. С этих позиций в качестве перспективы предложены системы Fe—P, Fe—Sn, Be—Al, Cu—Sn и Hf—Pt.

Однако автор [22] исключил из рассмотрения возможность активации спекания за счет пластического течения при миграции вакансий в процессе растворения добавки. Между тем в случае преимущественной диффузии атомов присадки в частицы основного металла и образования вслед-

ствие этого диффузионной пористости в частицах присадки следует ожидать интенсификации усадки именно за счет пластического течения [23, 24]. Хорошим подтверждением этому положению являются системы Fe—Ni и Fe—Co. Однако марганец тормозит усадку железа, несмотря на то что он является акцептором электронов по отношению к железу и обладает еще более низкой теплотой испарения, чем никель. Авторы связывают это с плохой восстановимостью оксидов марганца, которые препятствуют диффузии, действуя как механические примеси. Кроме того, тормозящее влияние оказывает упрочнение феррита при диффузии в него марганца.

Приведенные факты свидетельствуют о том, что реализация концепции Г.В. Самсонова подразумевает необходимость выполнения некоторых дополнительных условий. В системе Fe—Mn необходимо минимизировать влияние процессов окисления. Следует ограничить упрочнение феррита марганцем. С этой целью может быть использован разработанный в 1960—1970-е годы в Институте проблем материаловедения процесс диффузионного насыщения железного порошка марганцем (а также хромом) из состава оксидов [25]. Задавая параметры процесса, можно контролировать степень насыщения частиц железа.

Интересно в этой связи отметить, что зависимость прессуемости железомарганцевых порошков от содержания марганца носит немонокотонный характер. Прессуемость порошков, содержащих 4 мас.% Mn, выше прессуемости исходного железного порошка [26]. Автор объясняет это восстановлением оксидов железа в процессе насыщения. Усадка железомарганцевых прессовок в зависимости от содержания марганца также изменяется немонокотонно: максимальная усадка наблюдается при 14,5 мас.% Mn. С большой долей вероятности можно предположить, что в опытах [26] были обеспечены условия для реализации концепции создания стабильных электронных конфигураций. Представляется перспективным продолжить соответствующие исследования, направленные, в частности, на снижение энергии активации горячей деформации. При этом наличие марганца в составе материала может выполнять функцию улучшения деформируемости, а также повышения устойчивости переохлажденного аустенита.

Целесообразность проведения аналогичных исследований применительно к системе Fe—Cr вызывает сомнения. Как и железо, хром имеет 4 ор-

битали из пяти с одним электроном с неспаренным спином. В отличие от железа пятая орбиталь не заполнена. При переходе одного электрона железа на незаполненную орбиталь хрома достигается максимальная плотность $3d$ -состояний с нескомпенсированными спинами электронов. Это обеспечивает увеличение сил связи «металл—металл» за счет усиления резонансно-ковалентной составляющей [27]. В соответствии с концепцией Г.В. Самсонова добавка хрома к железу должна снижать энергию активации уплотнения подобно тому, как это имеет место при горячем прессовании тугоплавких соединений, в которых преобладает доля ковалентной химической связи. В частности, в работах М.С. Ковальченко было показано, что энергии активации горячего уплотнения карбида циркония и карбида бора составляют 1,7 и 2,95 эВ, что, соответственно, в 2—3 раза ниже энергии активации самодиффузии в этих соединениях [28].

Однако имеющийся экспериментальный материал не подтверждает возможность снижения энергии активации уплотнения железа при введении хрома. Попытка объяснения причин плохой деформируемости композиций Fe—Cr может быть предпринята с позиций конфигурационной модели строения вещества: процесс рекристаллизации, который в значительной степени определяет способность материала к пластической деформации, заключается в увеличении степени стабилизации электронов в результате электронного обмена, что обуславливает изменение отношения концентрации делокализованных и локализованных электронов в стабильных электронных конфигурациях [29]. Пластическая деформация, вызывающая повышение плотности дислокаций, приводит к уменьшению степени локализации электронов в стабильных электронных конфигурациях, росту концентрации делокализованных электронов и расширению спектра конфигураций. Поэтому значения эффективной энергии активации собирательной рекристаллизации материалов с большей локализацией валентных электронов оказываются выше. Степень локализации электронов в стабильных d^5 -конфигурациях хрома и железа при температуре рекристаллизации составляет соответственно 73 и 46 %. Следовательно, при добавлении к железу хром должен затруднять протекание рекристаллизации и пластической деформации.

Тем не менее следует отметить, что по своему

кристаллическому строению, подобному α -железу, хром должен быть пластичным металлом. В ферритных сталях хром как ферритообразующий элемент способствует повышению скорости рекристаллизации и снижению сопротивления деформации [30].

Следует обратить внимание еще на одно обстоятельство, связанное с сужением γ -области железа при легировании хромом. Аналогичное явление наблюдается и при легировании молибденом, который замыкает γ -область при содержании 2,5—3,5 %. В конце 1990-х годов фирма «Mannesmann» (Германия) выпустила на рынок распыленный низколегированный железный порошок MSP3.5 Mo, содержащий 3,5 мас.% молибдена. Спекание материала на основе этого порошка осуществляется в α -фазе, что обеспечивает существенную активацию усадки. Причина заключается в том, что самодиффузия железа в α -фазе протекает примерно в 100 раз быстрее, чем в γ -фазе [31]. Можно предположить возможность реализации подобного эффекта в системе Fe—Cr при содержании 12,8 мас.% Cr. Однако информация о соответствующих исследованиях в литературе отсутствует. Исследования спекания и горячего уплотнения порошковых хромсодержащих материалов, как правило, проводились с использованием двух- или трехкомпонентных лигатур (феррохром, карбиды хрома и др.), что обуславливает некорректность оценок, связанных с выявлением особенностей влияния хрома на протекание указанных процессов [32, 33].

Очевидно, что при спекании композиций Fe—Cr превалирует действие иных факторов. Значения теплоты сублимации железа и хрома близки и составляют 350 и 338 кДж/моль соответственно, что сводит к минимуму предпосылки формирования диффузионной пористости [34]. Кроме того, температура плавления хрома выше, чем у железа. В соответствии с приведенными выше представлениями об активированном спекании температура плавления активирующей добавки должна быть существенно ниже по сравнению с материалом матрицы [22, 35].

Изложенные выше соображения свидетельствуют о том, что вопрос, касающийся возможности снижения энергии активации уплотнения композиций Fe—Cr, крайне сложный и неоднозначный. В этой связи следует вспомнить о том, что любое решеточное свойство является сложной функцией по меньшей мере 5 параметров — типа

структуры, координационного числа ближайшего окружения, энергии межатомного взаимодействия, заселенности различных орбиталей, главного квантового числа орбиталей [36].

Заканчивая эту в чем-то не бесспорную статью, следует отметить, что прошедшие после смерти Г.В. Самсонова десятилетия характеризовались неснижающимся интересом к его работам. Продолжаются исследования, направленные на поиск связи электронного строения со свойствами материалов [37–39]. В заключение хотелось бы привести слова выдающегося сербского ученого-порошкови́ка М.М. Ристича, стоявшего вместе с Григорием Валентиновичем у истоков рождения Международного института науки о спекании: «Поиски Г.В. Самсоновым сущности процесса спекания — это его незавершенный труд, который вписывает еще одну главу в книгу природы. Научное наследие Г.В. Самсонова — это ключ к пониманию логики процессов, без которого невозможно дальнейшее развитие технологии материалов» [10].

Выводы

1. Активация спекания в процессе формирования стабильных электронных конфигураций может осуществляться за счет:

— ускорения зернограницной гетеродиффузии материала матрицы в присутствии сегрегаций фазы, содержащей активирующую микродобавку (система W—Ni);

— интенсификации усадки при пластическом течении частиц материала матрицы, протеканию которого способствует формирование диффузионной пористости в частицах присадки в результате преимущественной диффузии атомов присадки в частицы основного металла (системы Fe—Ni, Fe—Co, Fe—Mn);

— увеличения коэффициента самодиффузии атомов основного металла за счет расширения области существования менее плотноупакованной кристаллической решетки (α -фазы) при растворении активирующей добавки (система Fe—Mo).

2. Снижение энергии активации уплотнения порошковых материалов на основе железа может быть обеспечено при введении добавок марганца. При этом перспективно применение технологии диффузионного насыщения. Вопрос об использовании хрома в качестве активатора не имеет однозначного ответа и предполагает необходимость дополнительного изучения.

Литература/References

1. Андриевский Р.А. Г.В. Самсонов и современное материаловедение. *Порошковая металлургия*. 1998. No. 1/2. С. 7–12.
Andrievskii R.A. Samsonov and modern material science. *Poroshkovaya Metallurgiya*. 1998. No. 1–2. P. 7–12 (In Russ.).
2. Ковальченко М.С., Куликов Л.М., Иващенко В.И., Тимофеева И.И. Вклад Г.В. Самсонова в создание и развитие материаловедения тугоплавких соединений. *Порошковая металлургия*. 2018. No. 1/2. С. 1–11.
Kovalchenko M.S., Kulikov L.M., Ivashchenko V.I., Timofeeva I.I. Grigori Samsonov's contribution in creating and developing of materials science of refractory compounds. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2018. Vol. 57. No. 1–2. P. 1–8.
3. Упадхья Г.Ш. Профессор Григорий Валентинович Самсонов — истинный ученый-материаловед. *Порошковая металлургия*. 2018. No. 1/2. С. 12–16.
Upadhyaya G.S. Professor Grigori Samsonov: Genuine materials scientist. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2018. Vol. 57. No. 1–2. P. 9–12.
4. Дорофеев Ю.Г. Памяти выдающегося ученого. *Sci. Sintering*. 1978. Vol. 10. Spec. Iss. P. 77–79.
Dorofeyev Yu.G. In memory of an outstanding scientist. *Sci. Sintering*. 1978. Vol. 10. Spec. Iss. P. 77–79 (In Russ.).
5. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. М.: Атомиздат, 1975.
Samsonov G.V., Serebryakova T.I., Neronov V.A. Borides. Moscow: Atomizdat, 1975 (In Russ.).
6. Самсонов Г.В., Кулик О.П., Полищук В.С. Получение и методы анализа нитридов. Киев: Наук. думка, 1978.
Samsonov G.V., Kulik O.P., Polishchuk V.S. Production and methods for the analysis of nitrides. Kiev: Nauk. dumka, 1978 (In Russ.).
7. Самсонов Г.В. Электронная теория спекания. *Sci. Sintering*. 1971. Vol. 3. Spec. Iss. P. 329–369.
Samsonov G.V. Electronic theory of sintering. *Sci. Sintering*. 1971. Vol. 3. Spec. Iss. P. 329–369 (In Russ.).
8. Stefanović D.Č., Petrović V., Ristić M.M. Contribution to electronic theory of consolidation process. *Sci. Sintering*. 1980. Vol. 12. No. 3. P. 147–154.
9. Дорофеев Ю.Г., Попов С.Н. Исследование срачивания металлов при динамическом горячем прессовании. *Порошковая металлургия*. 1971. No. 2. С. 44–51.
Dorofeyev Yu.G., Popov S.N. Welding together of metals during dynamic hot pressing. *Soviet Powder Metall. Met. Ceram.* 1971. Vol. 10. No. 2. P. 118–124.

10. Рустич М.М. Поиск Г.В. Самсоновым сущности процесса спекания. *Порошковая металлургия*. 1998. No. 1/2. С. 12—16.
Ristić M.M. G.V. Samsonov's search for the essential nature of the sintering process. *Powder Metall. Met. Ceram.* 1998. Vol. 37. No. 1—2. P. 11—14.
11. Дорофеев В.Ю., Свиридова А.Н. О значении процессов срачивания в трибоэлектрохимии и материаловедении. *Проблемы трибоэлектрохимии*: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. С. 68—73.
Dorofeyev V.Yu., Sviridova A.N. On the importance of joining processes in triboelectrochemistry and materials science. In: *Problems of triboelectrochemistry*: Proc. of International scientific and technical conference. Novocherkassk: YuRGTU, 2006. P. 68—73 (In Russ.).
12. Самсонов Г.В. Приложение электронной теории к спеканию керамических материалов. *Неопубл. работа*. 1975. Цит. по [10].
Samsonov G.V. Application of the electronic theory to the sintering of ceramic materials. In: *Unpublished work*. Cited by [10] (In Russ.).
13. Тучинский Л.И. Твердофазное уплотнение армированных металлов. Киев: Наук. думка, 1980.
Tuchinskii L.I. Solid-phase consolidation of reinforced metals. Kiev: Nauk. dumka, 1980 (In Russ.).
14. Дорофеев Ю.Г. Механизм формирования материала при динамическом горячем прессовании пористых порошковых заготовок. *Порошковая металлургия*. 1970. No. 10. С. 33—37.
Dorofeev Yu.G. Mechanism of formation of material in the dynamic hot pressing of porous powder blanks. *Soviet Powder Metall. Met. Ceram.* 1970. Vol. 9. No. 10. P. 809—812.
15. Shvab R., Sundaram M.V., Karlsson H., Chasoglou D., Berg S., Hryha E., Nyborg L. Manufacturing of valve bridge component utilizing lean alloyed powders and vacuum sintering. *Powder Metall. Prog.* 2018. Vol. 18. No. 1. P. 031—039. URL: <http://dx.doi.org/10.1515/pmp-2018-0004>.
16. Sulowski M. Development of PM manganese steels. In: *Proc. Euro PM 2004. Powder metallurgy world congress and exhibition* (Vienna, Austria, 17—21 Oct. 2004). Austria Centre, EPMA, 2004. Vol. 2. P. 297—301.
17. Neumann B., Kothhoff G., Arnhold V. REACH: Risks, challenges and opportunities for sintered parts manufacturers. URL: <http://www.epma.com/reach-downloads> (дата обращения 07.08.2018).
18. Šalak A. Sintered manganese steels. 2. Manganese evaporation during sintering. *Powder Metall. Int.* 1980. Vol. 12. No. 2. P. 72—75.
19. Šalak A., Selecká M. Adverse effect of high purity atmosphere on sintering of manganese steels. *Powder Metall.* 2010. Vol. 53. No. 4. P. 285—293.
20. Баглюк Г.А. Горячая штамповка порошковых быстрорежущих сталей. *Порошковая металлургия*. 2005. No. 9—10. С. 16—20.
Baglyuk G.A. Hot forming of powder high-speed steels. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2005. Vol. 44. No. 9—10. P. 426—428.
21. Ютишев А.С. Разработка технологии производства биметаллических дисковых фрез с рабочими элементами из порошковых быстрорежущих сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: НГТУ, 1994.
Yutishev A.S. Development of production technology for bimetallic disk mills with working elements from powder high-speed steels: Abstract of the dissertation of PhD. Novocherkassk: NGTU, 1994 (In Russ.).
22. German R.M. A quantitative theory of diffusional activated sintering. *Sci. Sintering*. 1984. Vol. 16. Spec. Iss. P. 75—85.
23. Федорченко И.М., Иванова И.И. Влияние присадок никеля, кобальта и марганца на активацию процесса спекания металлокерамического железа. Сообщение 1. *Порошковая металлургия*. 1966. No. 9. С. 17—27.
Fedorchenko I.M., Ivanova I.I. Activation of the sintering of iron powder by nickel, cobalt, and manganese additions. I. *Soviet Powder Metall. Met. Ceram.* 1966. Vol. 5. No. 9. P. 694—702.
24. Федорченко И.М., Скороход В.В. Теория и практика спекания. *Порошковая металлургия*. 1967. No. 10. С. 29—30.
Fedorchenko I.M., Skorokhod V.V. Theory and practice of sintering. *Soviet Powder Metall. Met. Ceram.* 1967. Vol. 6. No. 10. P. 790—805.
25. Радомысльский И.Д., Клевцов В.Н. Химизм и кинетика процессов диффузионного хромирования и марганценирования железного порошка в водороде. *Спеченные конструкционные материалы*: Матер. III Всесоюз. семинара по спеченным конструкционным материалам (г. Киев, апр. 1975 г.). Киев: ИПМ АН УССР, 1976. С. 3—15.
Radomysel'skii I.D., Klevtsov V.N. Chemism and kinetics of diffusion chrome plating and manganization of iron powder in hydrogen. In: *Sintered structural materials: Materials of III All-Union seminar on sintered structural materials* (Kiev, April 1975). Kiev: IPM of Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1976. P. 3—15 (In Russ.).
26. Мартюхин И.Д. Железомарганцевые конструкционные материалы, их свойства и применение. *Спеченные конструкционные материалы*: Сб. докл. II Все-

- союз. семинара по спеченным конструкционным материалам (г. Киев, ноябрь 1972 г.). Киев: ИПМ АН УССР, 1974. С. 139—142.
- Martyukhin I.D.* Iron-manganese structural materials, their properties and application. In: *Sintered structural materials: Materials of II All-Union seminar on sintered structural materials*. Kiev: IPM of Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1976. P. 139—142 (In Russ.).
27. *Шерман А.Д., Жуков А.А., Абдуллаев Э.В.* и др. Чугун: Справ. изд. М.: Металлургия, 1991.
Sherman A.D., Zhukov A.A., Abdullaev E.V. et al. Cast iron. Moscow: Metallurgiya, 1991 (In Russ.).
28. *Ковальченко М.С.* Горячее прессование порошков тугоплавких соединений и материалов на их основе. *Порошковая металлургия*. 1998. No. 1/2. С. 42—52.
Koval'chenko M.S. Hot pressing powders of refractory compounds and materials based on them. *Powder Metall. Met. Ceram.* 1998. Vol. 37. No. 1—2. P. 37—44.
29. *Kushtalova I.P., Ristić M.M.* Recrystallization of refractory materials. I. Physical essence of recrystallization. *Sci. Sintering*. 1984. Vol. 16. Spec. Iss. P. 111—113.
30. *Чижиков Ю.М.* Прокатываемость стали и сплавов. М.: Металлургиздат, 1961.
Chizhikov Yu.M. Rollability of steel and alloys. Moscow: Metallurgizdat, 1961 (In Russ.).
31. *Link R.* Advances in PM structural and material process technology. In: *Advances in structural PM component production: Proc. 1997 Eur. conf. on advances in structural PM component production* (Munich, Germany, 15—17 Oct. 1997). P. 20—26.
32. *Радомысльский И.Д., Аракелян Н.А.* Исследование процесса усадки при спекании металлокерамической хромистой стали. *Порошковая металлургия*. 1967. No. 3. С. 24—31.
Radomysel'skii I.D., Arakelyan N.A. Shrinkage during the sintering of powder chromium steel. *Soviet Powder Metall. Met. Ceram.* 1967. Vol. 6. No. 3. P. 188—193.
33. *Дорофеев Ю.Г.* Работа уплотнения пористых материалов при прессовании. *Порошковая металлургия*. 1967. No. 3. С. 11—16.
Dorofeev Yu.G. Work of densification of porous materials during compaction. *Soviet Powder Metall. Met. Ceram.* 1967. Vol. 6. No. 3. P. 178—182.
34. *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М.* и др. Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991.
Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskii A.M. et al. Physical quantities. Moscow: Energoatomizdat, 1991 (In Russ.).
35. *German R.M., Rabin B.H.* Enhanced sintering through second phase additions. *Powder Metall.* 1985. Vol. 28. No. 1. P. 7—12.
36. *Андреева Т.В., Горячев Ю.М., Ковенская Б.А.* Зависимость физических свойств тугоплавких соединений от электронного строения. *Sci. Sintering*. 1984. Vol. 16. Spec. Iss. P. 59—63.
Andreeva T.V., Goryachev Yu.M., Kovenskaya B.A. Dependence of physical properties of high refractory compounds on electronic structure. *Sci. Sintering*. 1984. Vol. 16. Spec. Iss. P. 59—63 (In Russ.).
37. *Андреевский Р.А.* Роль строения материала в процессе уплотнения. *Sci. Sintering*. 1984. Vol. 16. Spec. Iss. P. 107—109.
Andrievskii R.A. The role of materials structure in the densification process. *Sci. Sintering*. 1984. Vol. 16. Spec. Iss. P. 107—109 (In Russ.).
38. *Степанов С.И.* Зависимость уплотнения порошков элементов при прессовании от электронного строения атомов. *Неорганические материалы*. 1983. Т. 19. No. 9. С. 1580—1582.
Stepanov S.I. Dependence of compaction of powders of elements at pressing from electronic structure of atoms. *Neorganicheskie materialy*. 1983. Vol. 19. No. 9. P. 1580—1582 (In Russ.).
39. *Мордасов М.Д., Фирсова А.В., Мордасов Д.М.* Влияние истинной плотности частиц порошковых систем на их фрактальную размерность. *Вестн. ТГТУ*. 2017. Т. 23. No. 2. С. 348—355.
Mordasov M.D., Firsova A.V., Mordasov D.M. Influence of the true particle density of powder systems on their fractal dimension. *Vestnik TGTU*. 2017. Vol. 23. No. 2. P. 348—355 (In Russ.).