

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 20. Выпуск 1.

УДК 539.21:621.785

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-1-352-369

Из истории состояния сверхпластичности металлических систем¹

А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, А. Н. Чуканов, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий, Е. В. Цой,
А. А. Калинин

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула.

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Сергеев Александр Николаевич — доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула.

e-mail: ansergueev@gmail.com

Чуканов Александр Николаевич — доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула.

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула.

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Малий Дмитрий Владимирович — старший преподаватель кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула.

e-mail: maliydmitriy@yandex.ru

Цой Евгений Владимирович — учебный мастер кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула.

e-mail: aspiring94@yandex.ru

Калинин Антон Алексеевич — инженер, Тульский государственный университет, г. Тула.

e-mail: antony-ak@mail.ru

Аннотация

В статье представлена ретроспектива становления и развития одного из уникальных явлений металловедения и физики металлов – сверхпластичности. Дана историческая справка использования больших пластических деформаций в ранних технологиях человеческого общества. Очерчен круг материалов, демонстрирующих сверхпластичность. Приведен перечень основных исследований в области механики сверхпластичности, а также металловедения и физики сверхпластичных материалов. Раскрывается роль первых экспериментов Анри Эдуарда Треска (Tresca), Барре де Сен-Венана (Saint-Venant), Г. Д. Бенгаха. Представлены в качестве первопроходцев сверхпластичности: автор первой широко известной научной статьи о сверхпластичности – С. Е. Пирсон и советские ученые – авторы самого названия «сверхпластичность» – академик А. А. Бочвар и З. А. Свицерская. Описано современное состояние исследований в области сверхпластичности металлических систем

¹Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России по проекту №11.6682.2017/8.9.

(металлов, сталей, цветных сплавов), а также важность использования явления сверхпластичности в промышленных технологиях, при создании ресурсосберегающих процессов: обработки металлов и сплавов давлением (бесфильтрованного волочения, вакуумной и газовой формовки, объемного деформирования и формоизменения); объемной штамповки инструментальных углеродистых и высоколегированных металлорежущих сталей и порошковых сплавов; химикотермической, термоциклической, термомеханической и термической обработки металлических, композиционных и металлокерамических материалов; сварки металлов давлением в твердом состоянии; получения волокнистых композиционных материалов методами прокатки или горячего прессования пакетов из сверхпластичных металлических фольг, между которыми располагаются ряды высокопрочных керамических волокон. Примерами создания малоотходных технологий могут служить разработанные в Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН малоотходные процессы сверхпластического деформирования быстрорежущих сталей разной металлургической природы и малопереходные процессы переработки порошков быстрорежущей стали, получаемых распылением или из стружечных отходов, в заготовки инструмента различного профиля.

Ключевые слова: сверхпластичность, металлостроение, механика, математика, физика металлов, деформация, пластическое формоизменение, ресурсосберегающие технологии, металлостроительные системы.

Библиография: 62 названия.

Для цитирования:

А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, А. Н. Чуканов, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий, Е. В. Цой, А. А. Калинин. Из истории состояния сверхпластичности металлических систем // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 1, С. 352–369.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 20. No. 1.

UDC 539.21:621.785

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-1-352-369

Excerpts on the history of superplasticity state of metal systems²

A. E. Gvozdev, A. N. Sergeev, A. N. Chukanov, S. N. Kutepov, D. V. Maliy, E. V. Tsoy,
A. A. Kalinin

Gvozdev Aleksander Evgenievich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief researcher of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula.

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Sergeev Aleksander Nikolaevich — Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula.

e-mail: ansergueev@gmail.com

Chukanov Aleksander Nikolaevich — Doctor of technical sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula.

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Kutepov Sergey Nikolaevich — Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula.

e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

²The work has been prepared within the framework of the fulfillment of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on project No. 11.6682.2017 / 8.9.

Maliy Dmitry Vladimirovich — Senior Lecturer of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula.

e-mail: maliydmityriy@yandex.ru

Tsoy Evgeniy Vladimirovich — Lab Instructor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula.

e-mail: aspiring94@yandex.ru

Kalinin Anton Alekseevich — Engineer, Tula State University, Tula.

e-mail: antony-ak@mail.ru

Abstract

The article presents a retrospective of the formation and development of one of the unique phenomena in metal science and metal physics – superplasticity. The paper gives historical background on the use of large plastic deformations in the early technologies of human society. It delineates a range of superplastic materials. The article provides a list of the basic studies in the field of superplasticity mechanics, as well as the science and physics of superplastic materials. The paper explains the role of the first experiments by Henri Edouard Tresca, Barre de Saint-Venant, G. D. Bengough. The article presents the following authors as pioneers of superplasticity: S.E. Pearson, who is the author of the first well-known scientific paper on superplasticity, and the Soviet scientists – academician A. A. Bochvar and Z. A. Sviderskaya, who are the authors of the term ‘superplasticity’. The article describes the current state of research in the field of superplasticity of metal systems (metals, steels, non-ferrous alloys), as well as the importance of using the phenomenon of superplasticity in industrial technologies when creating resource-saving processes: processing of metals and alloys by pressure (filter-free drawing, vacuum and gas forming, volumetric deformation and forming); volume stamping of tool carbon and high-alloy metal-cutting steels and powder alloys; chemical-thermal, thermocyclic, thermomechanical and thermal treatments of metal, composite and metal-ceramic materials; welding of metals by pressure in a solid state; production of fibrous composite materials by rolling or hot pressing of packages made of superplastic metal foils between which there are rows of high-strength ceramic fibers. As the examples of low-waste technologies, the authors refer to the developed at the Institution of Russian Academy of Sciences A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS low-waste processes of superplastic deformation of high-speed steels of different metallurgical nature and low-pass processes of processing of high-speed steel powders obtained by spraying or from chip waste into tool blanks of various profiles.

Keywords: superplasticity, metallurgy, mechanics, mathematics, metal physics, deformation, plastic forming, resource-saving technologies, metal systems.

Bibliography: 62 titles.

For citation:

A. E. Gvozdev, A. N. Sergeev, A. N. Chukanov, S. N. Kutepov, D. V. Maliy, E. V. Tsoy, A. A. Kalinin, 2019, "Excerpts on the history of superplasticity state of metal systems", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 20, no. 1, pp. 352–369.

1. Введение

Явление сверхпластичности (СП) материалов связано с использованием больших и очень больших пластических деформаций. Их применение началось с начала нашей эры. Ещё в древнем Китае вырабатывали сложноузорчатую декоративную ткань – парчу, включающую в себя тончайшие нити из золота, серебра или имитирующих их металлов. Получение этих нитей было неразрывно связано с реализацией значительных пластических деформаций, сопоставимых по величине с характерными для СП. Богатейшее шитье золотыми и серебряными нитями, имевшееся во всех дореволюционных христианских монастырях и храмах, – это были дары

именитых вкладчиков или результаты искусного труда местных монахинь. Золотые купола храмов – еще один пример использования СП. Купола покрывали тончайшими листами так называемого сусального золота. Эти листочки получали путем «расковки» горошины золота маленькими молоточками, так что исходная толщина горошины-«заготовки» уменьшалась в тысячу раз. В конце 1940-х – начале 50-х годов «книжечки» сусального золота свободно и недорого продавались в отечественных ювелирных магазинах.

С точки зрения современной науки о металлах сверхпластичность (англ. *superplasticity*) – это состояние материала, имеющего кристаллическую структуру, которое допускает деформации, на порядок превышающие максимально возможные для этого материала в обычном состоянии [1]. СП характеризуется рядом признаков: – аномально высоким ресурсом деформационной способности; – напряжением течения материала в несколько раз меньше предела текучести, характеризующего пластическое состояние данного материала; – крайне незначительным деформационным упрочнением; – повышенной чувствительностью напряжения течения материала к изменению скорости деформации. СП обычно наступает при температурах, превышающих половину температуры плавления по абсолютной шкале. Образцы в состоянии СП при растяжении, как правило, не образуют «шейки» и не подвержены инерциальной кавитации, что имеет место при разрушении образцов в состоянии обычной пластичности. Многие аморфные материалы (например, стёкла и полимеры) также демонстрируют возможность больших деформаций при повышенных температурах, однако их состояние не относится к СП, так как эти материалы не кристаллические вещества. Их состояние описывается законами поведения ньютоновской жидкости.

Состояние СП характерно для металлов и керамик с мелким размером зерна, обычно меньше 20 мкм. Кроме достаточно мелкого зерна, от материала для достижения состояния сверхпластичности требуется высокая однородность распределения по объему термопластичных компонентов, которые связывают между собой границы зерен в процессе пластического течения, позволяя материалу сохранять свою кристаллическую структуру. Для металлов до сих пор нет однозначно принятого мнения о механизме возникновения состояния СП. Считается, что он лежит в области явлений атомарной диффузии и проскальзывания зерен относительно друг друга.

Цель данной работы – осветить основные моменты в истории открытия, исследований и научного обоснования явления СП металлов, представить имена знаковых ученых, развивших направление СП, представить пути промышленного использования различных граней явления сверхпластичности металлических сплавов.

Основная идея. Для научных сообществ, работающих в близких областях с одними и теми же материалами характерна, к сожалению, некоторая разобщенность в методах исследований, анализа и даже языке изложения результатов. Этот негативный факт мешает ученым активно сотрудничать даже в смежных областях и просто понимать друг друга. Это явление сыграло свою роль и в истории открытия и анализа явления СП. Противоречивые, а зачастую просто взаимно исключаящие теоретические обоснования СП, развивали, каждые со своей стороны, как ученые-механики, так и металловеды.

2. История открытия явления сверхпластичности

Наиболее ярким примером самых ранних исследований СП учеными-механиками являются опыты Анри Эдуарда Треска (Tresca H.) с 1864 по 1872 гг. по течению твердых тел [3]. Краткое описание этих опытов приводится в книге Дж. Ф. Белла [4]. За 8 лет Треска провел необычайно большое число экспериментов по пластическому деформированию множества твердых тел, – от свинца и меди до льда, парафина и керамической пасты. Он продемонстрировал, что существуют измеримые и воспроизводимые параметры, которые могли создать основу для

теории больших пластических деформаций в твердых телах.

Большую часть опытов Треска выполнил на свинце. Он выбивал из листов цилиндрические элементы при помощи закаленного стального стержня (пуансона) меньшего диаметра; выдавливал цилиндрические образцы через круглые, треугольные и прямоугольные сквозные отверстия и в тупиковые углубления; сжимал цилиндрические образцы кругового сечения, помещенные между закаленными плитами; исследовал обратную экструзию сплошных цилиндров различной толщины при наличии и отсутствии бокового стеснения и т. п. Для того, чтобы наблюдать течение, он создал образцы в виде пакета отдельных пластин. Измерения состояли в фиксации приложенного давления и соответствующих изменений в форме и положении отдельных пластин. Поперечные разрезы пакета, производившиеся в конце каждого из опытов, позволяли ему детально описать, где каждое сечение тела текло в процессе эксперимента данного типа. Для более мягких материалов (глина, парафин и др.) он использовал слоистые маркеры различных цветов, чтобы проследить путь течения.

Основными открытиями А. Э. Треска Дж. Белл считал следующие выводы:

- 1) твердые тела при достаточных уровнях давления могут течь подобно жидкостям;
- 2) существует промежуточная область пластического упрочнения, имеющая место за пределом упругости и до того, как начинается постоянное течение;
- 3) существует характеристика материала (коэффициент K), выражающая максимальное касательное напряжение, при котором независимо от типа опыта твердое тело течет;
- 4) при пробивке цилиндрическим пуансоном цилиндрического блока длина выбиваемой части L связана с радиусом штампа R_1 и радиусом образца R зависимостью: $L = R_1 \times [1 + \lg(R/R_1)]$;
- 5) пластическое течение твердых тел происходит без изменения объема (является изохорическим).

Несмотря на то, что один из создателей теории пластичности Барре де Сен-Венан сразу признал и восторженно описал как выдающееся достижение третье из этих открытий, продемонстрировавшее важность критерия предельного касательного напряжения при построении теории пластичности [5, 6]. Сам же А. Э. Треска, по-видимому, считал своим наибольшим достижением формулу для длины выбиваемой части стержня [3].

Первые научные сообщения металлургов об удивительной способности некоторых металлических материалов к большим пластическим деформациям появились, в 10-30-х гг. прошлого столетия.

Наиболее ранним сообщением является, опубликованная в 1912 г. работа Г. Д. Бенгаха (*Bengough G. D.*) [7], в которой на образцах из латуни при температуре 700 °С была достигнута относительная деформация 163 %.

В 1920 г. известный английский металлург Розенгейн (*Rosenghain*) [8] исследовал поведение сплава цинка, алюминия и меди, прокатанного при 250 °С. Он установил, что величина удлинения до разрыва образцов, изготовленных из этого материала, существенно зависит от скорости нагружения. При быстром нагружении образцы проявляли обычное поведение. При медленном – квазистатическом нагружении до небольших значений нагрузки они начинали вести себя так, как если бы были изготовлены из смолы или дегтя. Были достигнуты удлинения в сотни процентов, что для того времени было совершенно новым и удивительным фактом.

Никто тогда не мог и предположить, что металлический сплав может вести себя, как вязкая жидкость. Этот факт требовал своего объяснения.

Розенгейн предположил, что такое удивительное изменение свойств кристаллического материала как СП является следствием прокатки – она частично аморфизует структуру материала. Не соглашаясь с этой точкой зрения, З. Джеффри и Р. С. Арчер (*Jeffries Z. and Archer R. S.*) [9], одними из первых обратили внимание на то, что кажущаяся аморфизация структуры материала связана с имеющим место при прокатке измельчением зерна, что

приводит к резкому усилению влияния границ зерен. С. Н. Дженкинс (*Jenkins C. N.*) [10] в 1928 г. при растяжении образцов, изготовленных из предварительно прокатанных сплавов кадмий-цинк и олово-свинец, установил, что удлинение до разрыва сильно зависит от скорости приложения нагрузки и ее величины. Для сплава олово-свинец были достигнуты удлинения вплоть до 400 %. Ф. Харгривс (*Hargreaves F.*) [11, 12], исследуя методом Бринелля твердость легкоплавких эвтектических сплавов, установил, что она может быть существенно уменьшена посредством предварительнойковки.

В 1934 г. была опубликована работа преподавателя металлургии в Армстронг-Колледже (Великобритания) С. Е. Пирсона (*Pearson C. E.*) [13], которая сейчас признана классической, несмотря на то, что она была полностью забыта в конце 30-х гг. Известный польский исследователь Мацей Грабский приписывает Пирсону в своей книге [14] честь открытия явления СП.

Пирсон исследовал механическое поведение сплавов на основе олова: олово-свинец (*Sn-Pb*) и олово-висмут (*Sn-Bi*). Из слитков методом обратного выдавливания Пирсон получал пруток. Цилиндрические образцы испытывались на растяжение при различных условиях нагружения и разном времени выдержки после экструзии. Из полученных результатов следовало, что величина удлинения до разрыва растет по мере снижения нагрузки и уменьшения времени выдержки после экструзии. Для достижения еще больших удлинений Пирсон предложил проводить испытание при постоянном напряжении течения. С этой целью он уменьшал величину приложенной к образцу нагрузки по мере уменьшения площади его поперечного сечения, что позволило достичь рекордного значения удлинения в 1950 % для сплава *Sn-Bi*. Для того чтобы сфотографировать полученный в итоге образец, длина которого составила 82,1 дюйма (при исходной длине рабочей части 4 дюйма), его пришлось свернуть в спираль. Эта фотография стала классическим примером СП и приводится теперь во многих учебниках.

Несомненной заслугой С. Е. Пирсона является и то, что он впервые провел систематические микроструктурные исследования. С. Е. Пирсон отметил, что, несмотря на чрезвычайно большие удлинения (вплоть до 2000 %), он не обнаружил при микроскопическом исследовании полос сдвига внутри зерен. Кроме того, размер зерен не менялся в ходе деформации. Все это позволило не только подтвердить гипотезу З. Джеффри и Р. С. Арчера [9] о том, что предварительная обработка (прокатка или экструзия) измельчает зерно, но также и выдвинуть гипотезу о том, что основным механизмом деформации является зернограничное скольжение (ЗГС). С. Е. Пирсон установил, что наблюдаемая «вязкая» деформация не является ньютоновским течением. Напряжение не было прямо пропорционально скорости деформации и материал вел себя так, как если бы его вязкость уменьшалась с увеличением напряжения течения. В этом смысле поведение исследуемых сплавов напоминает поведение коллоидных растворов и некоторых дисперсных систем, например, суспензий частиц микроскопических размеров.

Как и всякая классическая работа, статья С. Е. Пирсона и сейчас, спустя 60 лет, не утратила своего значения и представляет несомненный практический интерес для всех исследователей, изучающих явление СП. В 1994 г. Манчестерский университет провел даже специальную международную конференцию, посвященную 60-летию выхода в свет работы С. Е. Пирсона. Эмблемой конференции был знаменитый образец С. Е. Пирсона (рис.1).

Работа С. Е. Пирсона была незаслуженно забыта в конце 1930-х гг. Исторически сложилось так, что развитие дальнейших исследований явления сверхпластичности связано с именами наших соотечественников – советских ученых – академика А. А. Бочвара и его сотрудницы З. А. Свицкерской.

А. А. Бочвар и З. А. Свицкерская обнаружили очень странное поведение литых сплавов цинка с 15-20 % алюминия (*Zn-22 % Al* («цинкаль»)) при дилатометрическом анализе: закаленные образцы при нагреве до температур выше 150 °С становились такими мягкими,

что спрессовывались под действием пружинок оптического дилатометра. При этом твердость сплава монотектоидного состава оказалась на порядок меньше, чем у чистых компонентов сплава: цинка и алюминия, а относительное удлинение достигло 450 %, что было совершенно необычно для литого материала [15].



Рис.1: Образец С. Е. Пирсона – эмблема международной конференции ICSAM (International Conference on Superplasticity in Advanced Materials), посвященной 60-летию выхода в свет его работы

А. А. Бочвар был первым, кто понял, что перечисленные факты указывают на существование нового явления, названного им «сверхпластичностью». Этот термин стал международным. Чтобы объяснить экспериментально наблюдаемые большие деформации при исчезающе малых напряжениях, предложил теорию [15, 16], суть которой заключалась в том, что в двухфазных материалах типа цинкала изменение формы образца может осуществляться за счет направленного диффузионного переноса массы. А. А. Бочвар первым указал на то, что при сверхпластической деформации (СПД) должен протекать еще один процесс, который был назван им «залечиванием» очагов разрушения при перемещениях. Таким образом, в работах А. А. Бочвара в 40-е годы XX века было вновь открыто явление СП. Нашими соотечественниками было введено в науку само это понятие, сформулированы основные требования к структуре двухфазных сверхпластичных сплавов и выдвинута гипотеза о механизме СПД, которая была подтверждена результатами более поздних исследований.

Классическое определение сверхпластичности было дано учеником А. А. Бочвара профессором И. И. Новиковым [17]. Сверхпластичность – это способность металлических тел квазиравномерно удлиняться с высокой скоростной чувствительностью напряжения течения ($m > 0,2 \dots 0,3$) Установлены два типа сверхпластичности: структурная (изотермическая) сверхпластичность материалов с ультрамелким зерном и сверхпластичность превращения, обусловленная фазовым превращением и наиболее ярко проявляющаяся при циклических изменениях температуры. Далее будет рассмотрена только структурная сверхпластичность.

Эта тема была продолжена А. А. Пресняковым. В конце 50-х – начале 60-х годов А. А. Пресняков с сотрудниками обнаружил СП во многих системах. Им было опубликовано множество работ, в частности книга [18], переизданная в 1976 г. в Великобритании. Он одним из первых сформулировал и стал неутомимо пропагандировать представление о механизме и сути того, как, происходит само деформирование при СП. Он утверждал, что при больших пластических деформациях, несмотря на то, что достигаются удивительно большие относительные удлинения вплоть до нескольких тысяч процентов, происходит локализация деформации. Концепция получила название «бегающей шейки» при растяжении.

Вплоть до начала 1960-х гг. большинство исследователей относилось к СП, как к экзотическому явлению, которое может наблюдаться только у крайне ограниченного числа материалов, в чрезвычайно узком температурном диапазоне; в связи с чем СП может рассматриваться не более, как некий «фокус», довольно занимательный, но вряд ли имеющий какое-либо практическое значение. Положение коренным образом изменилось после того, как в 1964 г. группа

исследователей под руководством В. А. Бекофена (*Backofen W. A., Turner G. R., Avery D. H.*) из Массачусетского технологического института опубликовала работу [19], в которой исследовалась сверхпластичность цинкала в плане ее практического освоения. С этой целью из листовой заготовки толщиной 0,76 мм через матрицу диаметром 100 мм методом свободного выдувания были отформованы купола большего диаметра, чем диаметр матрицы. Стало очевидным, что явление СП может быть использовано в технологических процессах обработки металлов давлением. Это привело к бурному развитию исследований природы и механизмов СП; в периодической печати стало появляться столько публикаций по СП, что к концу 60-х гг. ситуация приобрела характер информационного «взрыва».

Значение работы [19] настолько велико, что М. Грабский в [14] называет ее «вторым открытием сверхпластичности» (напомним, что честь первого открытия сверхпластичности, по его мнению, принадлежит Пирсону).

В 1964 В. А. Бэкофен с сотрудниками большое сопротивление образованию шейки при растяжении сверхпластичного материала объяснили высокой чувствительностью напряжения течения к скорости деформации. В этой же работе сообщалось о сенсационном эксперименте с выдувкой под небольшим газовым давлением куполообразной детали из сплава Zn – 22% Al [20]. Вскоре после этой публикации появились многочисленные предложения технологического использования сверхпластичности: пневмоформовка из листа изделий сложной формы (по аналогии с формованием изделий из термопластиков), объемная изотермическая штамповка труднодеформируемых сплавов и др.

3. Современное состояние проблемы сверхпластичности

Огромный интерес к проблеме сверхпластичности проявился в резком числе публикаций в 60-х годах. Начиная с 1964 г. ведет свой отсчет история широкомасштабных исследований явления СП, которое находит все большее применение в различных отраслях промышленности. Количество публикаций, посвященных исследованию СП, растет с каждым годом. На сегодняшний день проведено уже восемь международных конференций по СП, которые носят краткое название ICSAM (International Conference on Superplasticity in Advanced Materials): ICSAMг – Сан-Диего, Калифорния, США; ICSAM – Гренобль, Франция; ICSAM – Блэйн, Вашингтон, США; ICSAM – Осака, Япония; ICSAM 1994 г. – Москва, Россия.

Выбор в 1994 году Москвы в качестве места проведения представительного международно-го форума не случаен. Известный американский ученый Теренс Лэнгдон пишет в предисловии к сборнику трудов этой конференции: «Хотя явление сверхпластичности впервые было продемонстрировано в научных экспериментах, проведенных в Великобритании, большая часть систематических научных исследований этого явления была проведена в России. Действительно, даже сам международный термин «superplasticity» является прямым переводом русского слова «сверхпластичность» ...» [21].

Анализ представленных на Московскую конференцию ICSAM в 1994 г. докладов дает достаточно полное представление о современном состоянии и масштабах исследований по сверхпластичности: и о богатом тематическом разнообразии, и о широкой географии участников. Основные направления: фундаментальные аспекты СП, СП нанокристаллических материалов, СП металлов, СП керамик, СП интерметаллидов, СП композитов с металлической матрицей, реология, механика и основы обработки, практическое применение СП. Страны участники: Великобритания, Германия, Дания, Индия, Италия, Казахстан, Канада, Китай, Кыргызстан, Латвия, Польша, Россия, Сингапур, США, Украина, Франция, Южная Корея, Япония.

В качестве ведущих научных центров СП в России можно назвать следующие: ВИАМ – Всероссийский институт авиационных материалов, г. Москва; ВИЛС – Всероссийский институт легких сплавов, г. Москва; Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка; Ин-

ститут физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск; Институт гидродинамики СО РАН, г. Новосибирск; Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа; Московский институт стали и сплавов; Нижегородский государственный университет; Научно-исследовательский институт авиационной технологии, г. Москва; «Прометей» – Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов, г. Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский Государственный университет.

Перечисление, только основных работ, ведущих советских и Российских ученых-механиков и металлургов, внесших вклад и развивающих сейчас исследования СП, займет целую страницу. Это Михлин С. Г. [22], Ильющин А. А. [23-27], Кайбышев О. А. [28, 29], Валиев Р. З. [30], Рабинович М. Х. [31, 32], Работнов Ю. Н. [33, 34], М. Х. Шоршоров [35], Тихонов А. С. [36], Смирнов О. М. [37], Гохфельд Д. А. [38], Поздеев А. А. [39], Лойцянский Л. Г. [40], Малинин Н. Н. [41], Партон В. З. [42], Гвоздев А. Е. [43]. Труды этих и многих других исследователей построены на физическом основании теории СП. Это прежде всего работы основоположников теории дефектов кристаллического строения Френкеля Я. М. [44], Ландау Л. Д., Лившица Е. М., [45, 46], Полухина П. И., Горелика С. С., Воронцова В. К. [47], Воыновой Т. Ф. [50], Бернштейна М. Л. [51], Штремеля М. А. [52, 53], Гуляева А. П. [54], Новикова И. И., Партнова В. К. [55], Преснякова А. А. [18] и др. [56-62]. Их работы позволили разработать новые методики и приборы анализа СП [48, 49] и использовать его в промышленности.

4. Выводы

На основании приведенного далеко не полного списка можно сделать следующие выводы. Явление СП исследуют во всем мире ученые самых различных специальностей. При этом, как правило, каждый исследовательский центр концентрирует свое внимание на той или иной стороне явления СП. Например, в Гренобле (Франция) основное внимание уделяется физическому аспекту природы СП; профессор Мак-Куин из Канады специализируется на исследовании особенностей протекания процессов динамической рекристаллизации в металлах и сплавах и т. д. Но в мире нет таких научных центров, в которых явление СП исследовалось бы комплексно, на различных масштабных уровнях, с привлечением ведущих специалистов самого различного профиля. Нет нигде – кроме России. В 1985 г. было принято решение о создании в СССР уникального мирового научного центра – Института проблем сверхпластичности металлов (ИПСМ). Для более успешного развития научных изысканий и непосредственной связи их результатов с производством в организационную структуру Института при его создании была заложена способствующая этому схема – соединение научно-исследовательского и конструкторско-технологического отделений и опытного производства. В ИПСМ работают известные у нас в стране и за рубежом исследователи. Уникальность ИПСМ состоит в том, что здесь рядом, в соседних лабораториях, работают ученые самых различных специальностей: физики, материаловеды, механики, технологи.

5. Заключение

Механика сверхпластичности еще не построена, но существует механика сверхпластичности в том смысле, что проводятся механические эксперименты для отыскания режима СП, определения скоростной чувствительности материала и т.д. Подтверждением сказанному служит и краткий исторический экскурс, проведенный в этой работе. Действительно, С. Е. Пирсон проводил интересные механические эксперименты и даже выяснил характер скоростной зависимости напряжений, но основная заслуга его состоит в том, что он первым сформулировал основной механизм СПД – зернограничное проскальзывание; предложил теорию диффузионного переноса массы; настаивает на механизме локализации деформации; В. Бэкофен

с коллегами осуществляет «второе открытие СП», отформовав купол методом свободного выдувания... Не кажется ли, что в изложении истории открытия и освоения СП чувствуется «рука» физика-материаловеда?

Явление сверхпластичности быстрорежущих сталей целесообразно применять в обработке давлением. При этом реализуются следующие преимущества:

- эффект сверхпластичности позволяет получать готовые детали сложной формы при меньшем числе операций, например, при штамповке или формовке;
- при деформации в условиях сверхпластичности существенно снижаются энергозатраты, что позволяет использовать оборудование меньшей мощности;
- снижаются стоимость инструмента и его износ в процессе эксплуатации;
- обработка давлением металлических материалов в режимах СП приводит к повышению таких технологических характеристик, как свариваемость, коррозионная стойкость, износостойкость;
- после деформирования в условиях СП в деталях снижаются остаточные напряжения, что обеспечивает высокую стабильность размеров изделий;
- в некоторых случаях СП является единственным источником повышения пластичности таких традиционно малопластичных материалов, каковыми являются металлокерамика и дисперсно-упрочненные сплавы.

На базе эффекта сверхпластичности разработаны принципиально новые процессы обработки давлением: бесфильтренное волочение, вакуумная и газовая формовка. В нашей стране впервые эти работы получили развитие в Московском институте сталей и сплавов под руководством Я. И. Охрименко и О. М. Смирнова. Наряду с этими процессами значительный интерес представляет и формообразование в жестких штампах. Под руководством О. А. Кайбышева разработаны промышленная технология и оснастка для глубокой вытяжки деталей из нержавеющей стали и трудно деформируемых сплавов. Аналогичные работы по объемной штамповке инструментальных углеродистых и сложнелегированных металлорежущих сталей выполнены в ТулГУ и ТГПУ им. Л. Н. Толстого. В последнем случае наряду с обычными заготовками использованы и полуфабрикаты, полученные с применением порошковой металлургии.

Благодаря особой способности активировать состояние материалов, явление сверхпластичности может найти широкое применение в процессах химикотермической, термоциклической, термомеханической, термической и др. обработок металлических, композиционных и металлокерамических материалов.

Сверхпластическое деформирование является основой для разработки малоотходных ресурсосберегающих технологических процессов.

Примерами создания малоотходных технологий могут служить разработанные в Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН и в базовой лаборатории ИМЕТ в ТулГУ «Новые процессы формоизменения металлических материалов специального назначения» малоотходные процессы сверхпластического деформирования быстрорежущих сталей разной металлургической природы и малопереходные процессы переработки порошков быстрорежущей стали, получаемых распылением или из стружечных отходов, в заготовки инструмента различного профиля. Эти процессы исключают операцию спекания. К ним относятся шаговая прокатка полосы, экструзия и изотермическая штамповка в режимах сверхпластической деформации. Первые два процесса позволяют получать длинномерные заготовки под сверла, развертки, метчики, а третий – заготовки под фрезы широкой номенклатуры и типов-размеров. Благодаря тому, что во всех случаях обеспечивается высокая дисперсность карбидных фаз и фрагментарная структура ферритной и мартенситной составляющих, характерных для термомеханической обработки, стойкость инструмента возрастает в 1,8...2,2 раза, а коэффициент использования материалов – до 0,87.

Кроме указанных выше преимуществ обработки давлением в режимах СП следует особо отметить повышение таких технологических характеристик как возможность получения изделий сложной формы при меньшем числе операций, например, при штамповке и формовке, снижение энергозатрат, возможность использования менее мощного оборудования, уменьшение стоимости инструмента, отсутствие остаточных напряжений, повышение ряда свойств изделий (коррозионная стойкость, износостойкость), улучшение свариваемости и т.д. В некоторых случаях СП служит единственным ресурсом повышения деформационной способности таких традиционно малопластичных материалов как металлокерамика и дисперсно-упрочненные Ni-Cr сплавы, например, типа ЖС6КП, инструментальные стали У8, Р6М5 и т.п. С применением СПД для термомеханического упрочнения $\alpha+\beta$ титановых сплавов и сталей получено рекордное сочетание прочности, пластичности и вязкости разрушения благодаря формированию мелкоблочной структуры. Одной из основных задач практического применения СП является получение достаточно мелкого зерна в заготовке для последующей обработки давлением в режимах СПД. Помимо обработки давлением и термомеханического упрочнения эффект СП используется и для сварки металлов давлением в твердом состоянии и получения волокнистых композиционных материалов методами прокатки или горячего прессования пакетов из СП металлических фольг, между которыми располагаются ряды высокопрочных керамических волокон. Эти процессы являются прямым следствием особо активированного состояния металлических сплавов при СПД. В отличие от традиционных методов сварки давлением сварка в режимах СП обеспечивает следующие преимущества: температура процесса снижается на 100-150 град, в несколько раз уменьшаются необходимые усилия, и в десятки раз сокращается длительность сварки. При получении композиционных материалов практически исключается дробление хрупких волокон [61].

Предыдущие исследования СП проводились физиками и материаловедцами. Все эти исследования, как правило, включают в себя элемент механических испытаний и опираются на них. Однако получилось так, что рассказывали об этих испытаниях сами же материаловеды, поэтому они, как правило, не обращали внимания на механические детали и использовались результаты механических испытаний только как подтверждение своих гипотез, касающихся особенностей структурного поведения материалов при пластической деформации и формоизменения.

Обычно все исследования по феноменологии СП включают в себя механический аспект, и в этой связи можно говорить о том, насколько грамотно (с механической точки зрения) они поставлены, насколько аккуратно (с математической точки зрения) обработаны полученные результаты, связанные с решением комплексных краевых задач механики, металловедения, физики конденсированного состояния и насколько корректно сформулированы полученные выводы.

При этом важно, чтобы краевые задачи были грамотно поставлены и корректно решены. В этом и состоит совместная комплексная работа механиков с физиками, математиками, специалистами по компьютерному моделированию, металловедцами, материаловедцами и технологами по созданию ресурсосберегающих технологий обработки сверхпластичных металлических систем.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быля О. В., Васин Р. А., Ермаченко А. Г. и др. О корреляции истории нагружения материала и эволюции его структуры в режиме сверхпластичности // В сборнике материалов IX Конференции по прочности и пластичности. – Москва, Россия, 22–26 января 1996. Т. 2. С. 33–38.
2. Гегузин Я. Е. Живой кристалл. – М.: Наука, 1987. 192 с.

3. Tresca H. Memoire sur lecoulement des corps solides soumis a 'des fortes pressions // Comptes Rendus de L'Academie des Sciences. Paris, 1864. V.59.
4. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел: В 2 ч. / Пер. с англ. – М.: Наука, 1984. Ч. 1. 596 с.; Ч. 2. 431 с.
5. Сен-Венан Б. Об установлении внутренних движений, возникающих в твердых пластических телах за пределами упругости / Теория пластичности. – М.: ИЛ, 1948. С. 11–19.
6. Сен-Венан Б. Дифференциальные уравнения внутренних движений, возникающих в твердых пластических телах, и граничные условия для этих тел. Некоторые приложения / Теория пластичности. – М.: ИЛ, 1948. С. 24–33.
7. Bengough G. D. J. Inst. Metals. 1912. V. 7. P. 123.
8. Rosenghain, Haughton, and Bingham // J. Inst. Metals. 1920. V. 23. P. 261144. Superplasticity in advanced materials / Ed.by Shigenori Hori, Masahary Tokizane, Norio Furushiro, JSRS, Japan. Osaka, June 3–6, 1991.
9. Jeffries Z. and Archer R. S. The science of metals. N. Y.: McGraw-Hill, 1924. 76 p.
10. Jenkins C. N. // J. Inst. Metals. 1928. V. 40. P. 21.
11. Hargreaves F. // J. Inst. Metals. 1928. V. 38. P. 315; V. 39. P. 301.
12. Hargreaves F. and Hills R. J. // J. Inst. Metals. 1928. V. 40. P. 41; 1929. V. 41. P. 257.
13. Pearson C. E. The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead-tin and bismuth-tin // J. Inst. Metals. 1934. V. 54. P. 111–123.
14. Грабский М. В. Структурная сверхпластичность металлов / Пер. с польск. – М.: Металлургия, 1975. 272 с.
15. Бочвар А. А. О разных механизмах пластичности в металлических сплавах // Изв. АН СССР. ОТН. 1948. № 5. С. 649–653.
16. Бочвар А. А., Свицерская З. А. Явление сверхпластичности в сплавах цинка с алюминием // Изв. АН СССР. ОТН. 1945. № 9. С. 821–824.
17. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1986. 480 с.
18. Пресняков А. А. Сверхпластичность металлов и сплавов. – Алма-Ата: Наука, 1969. 203 с.
19. Backofen W. A., Turner G. R., Avery D. H. Superplasticity in an Al-Zn alloy // Trans. Americ. Soc. Metals. 1964. V. 57. P. 980–990.
20. Бэкофен В. Процессы деформации. – М.: Металлургия, 1977. 288 с.
21. Superplasticity in advanced materials / Proceedings of 1994 Int. Conf. on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM-94) Moscow on May 24–26, 1994 / Editor T. G. Langdon. Switzerland – Germany – UK – USA. Trans. Tech. Publ.
22. Михлин С. Г. Основные уравнения математической теории пластичности. – Л.: АН СССР, 1934. 71 с.
23. Ильющин А. А. Пластичность. – М.: Гостехиздат, 1948. 376 с.

24. Ильюшин А. А. Некоторые основные задачи теории пластичности // Изв. АН СССР. ОТН. 1949. № 12.
25. Ильюшин А. А. Замечания о некоторых статьях, посвященных критике теории пластичности // Изв. АН СССР. ОТН. 1950. № 6. С. 940–951.
26. Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: АН СССР, 1963. 271 с.
27. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды. – М.: Изд-во МГУ, 1990. 310 с.
28. Кайбышев О. А. Пластичность и сверхпластичность металлов. – М.: Металлургия, 1975. 279 с.
29. Кайбышев О. А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. 264 с.
30. Кайбышев О. А., Валиев Р. З. Границы зерен и свойства металлов. – М.: Металлургия, 1987. 214 с.
31. Рабинович М. Х. Прочность и сверхпрочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. 200 с.
32. Рабинович М. Х. Прочность, температура, время. – М.: Наука, 1968. 160 с.
33. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. 752 с.
34. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. 744 с.
35. Сверхпластичность металлических материалов / М. Х. Шоршоров, А. С. Тихонов, С. И. Булат и др. – М.: Наука, 1973. 220 с.
36. Тихонов А. С. Эффект сверхпластичности металлов и сплавов. – М.: Наука, 1978. С. 142.
37. Смирнов О. М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. – М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
38. Гохфельд Д. А., Садаков О. С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. – М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
39. Поздеев А. А., Трусов П. В., Няшин Ю. И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. – М.: Наука, 1986. 232 с.
40. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. 840 с.
41. Малинин Н. Н. Ползучесть в обработке металлов. – М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
42. Партон В. З. Механика разрушения: От теории к практике. – М.: Наука, 1990. 240 с.
43. Гвоздев А. Е. Производства заготовок быстрорежущего инструмента в условиях сверхпластичности. – М.: Машиностроение, 1992. 176 с.
44. Френкель Я. М. Собрание избранных трудов. Т. 2. – Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 470 с.
45. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. 736 с.

46. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. 248 с.
47. Полухин П. И., Горелик С. С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. – М.: Metallurgy, 1982. 584 с.
48. Методы контроля и исследования легких сплавов: Справочник / А. М. Вассерман, В. А. Данилкин, О. С. Коробов и др. – М.: Metallurgy, 1985. 510 с.
49. Приборы и методы физического металловедения: Вып. 1. – М.: Мир, 1973. 428 с.; Вып. 2. – М.: Мир, 1974. 366 с.
50. Волынова Т. Ф. Высокомарганцовистые стали и сплавы / Т. Ф. Волынова. – М.: Metallurgy, 1988. 341 с.
51. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов. – М.: Metallurgy, 1977. 431 с.
52. Штремель М. А. Прочность сплавов. Ч. 2. Деформация. – МИСИС, 1997. 527 с.
53. Штремель М. А. Прочность сплавов. Ч. 1. Дефекты решетки. – МИСИС, 1999. 384 с.
54. Гуляев А. П. Сверхпластичность сталей: монография. – М.: Metallurgy, 1982. 56 с.
55. Новиков И. И., Партной В. К. Сверхпластичность сталей с ультрамелким зерном. – М.: Metallurgy, 1981. 168 с.
56. Гвоздев А. Е., Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Хонелидзе Д. М., Сапожников С. В. Аномальные механические свойства некоторых металлических систем: монография / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А. Е. Гвоздева. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 149 с.
57. Шоршоров М. Х., Гвоздев А. Е., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Кузовлева О. В., Селедкин Е. М., Клементьев Д. С., Калинин А. А. Моделирование процессов ресурсосберегающей обработки слитковых, порошковых, наноструктурных и композиционных материалов: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 359 с.
58. Гвоздев А. Е., Журавлев Г. М., Кузовлева О. В. Основы формирования состояния высокой деформационной способности металлических систем: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 382 с.
59. Шоршоров М. Х., Базык А. С., Казаков М. В., Гвоздев А. Е., Пустовгар А. С., Егоров Е. В., Герасин А. Н., Сидоров Б. П. Сверхпластичность сталей и сплавов и ресурсосберегающие технологии процессов обработки металлов давлением: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 158 с.
60. Гвоздев А. Е., Бреки А. Д., Дорохин Ю. С., Журавлев Г. М., Клементьев Д. С., Кутепов С. Н., Малий Д. В., Медведев П. Н., Минаев И. В., Сергеев А. Н., Хонелидзе Д. М. Программный комплекс расчета мощности сил, определяющих процессы пластического деформирования, поверхностного формоизменения и фрикционного взаимодействия слитковых, порошковых и нанокпозиционных металлических систем // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018661010 31.07.2018.
61. Гвоздев А. Е., Стариков Н. Е., Сергеев Н. Н., Кутепов С. Н., Сапожников С. В., Калинин А. А., Клементьев Д. С. Основы ресурсосберегающих процессов получения быстрорежущего инструмента: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 209 с.

62. Гвоздев А. Е., Стариков Н. Е., Сергеев Н. Н., Золотухин В. И., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Бреки А. Д. Технология конструкционных, эксплуатационных и инструментальных материалов: учебник. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 406 с.

REFERENCES

1. Bylia, O. V., Vasin, R. A., Ermachenko, A. G., et al. 1996, “On the correlation of the history of loading of the material and the evolution of its structure in the superplasticity regime” *In proceedings of IX Conferences on strength and ductility*. – Moskva, vol. 2. pp. 33–38.
2. Geguzin, Ya. E. 1987, “Zhivoj kristal” [Living crystal], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 192 p.
3. Tresca, H. 1864, “Memoire sur lecoulement des corps solides soumis a ‘des fortes pressions’”, *Comptes Rendus de L’Academie des Sciences*, Paris, 59 p.
4. Bell, Dzh. F. 1984, “Eksperimental’nye osnovy mekhaniki deformiruemyh tverdyh tel” [Experimental bases of mechanics of deformable solids], *Nauka, Moskva, Rossiya*, vol. 1, 596 p., vol. 2, 431 p.
5. Saint-Venant, B. 1948, “On the establishment of internal motions arising in rigid plastic bodies beyond the limits of elasticity”, *Teoriya plastichnosti (Theory of plasticity)*, *Moskva, Rossiya*, pp. 11–19.
6. Saint-Venant, B. 1948, “Differential equations of internal motions arising in rigid plastic bodies and boundary conditions for these bodies. Some applications”, *Teoriya plastichnosti (Theory of plasticity)*, *Moskva, Rossiya*, pp. 24–33.
7. Bengough, G. D. 1912, *Inst. Metals*, vol. 7, 123 p.
8. Rosenghain, Haughton, and Bingham 1920, *Inst. Metals*, vol.23. pp. 261–144. Superplasticity in advanced materials / Ed. by Shigenori Hori, Masahary Tokizane, Norio Furushiro, JSRS, Japan. Osaka, June 3-6, 1991.
9. Jeffries, Z., Archer R. S., 1924, *The science of metals*. N.Y.: McGraw-Hill. 76 p.
10. Jenkins, C. N., 1928, *Inst. Metals*, vol. 40, 21 p.
11. Hargreaves, F., 1928, *Inst. Metals*, vol. 38, 315 p., vol. 39, 301 p.
12. Hargreaves, F., Hills, R. J., 1928, 1929, *Inst. Metals*, vol. 40, 41 p., vol. 41, 257 p.
13. Pearson, C. E., 1934, “The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead-tin and bismuth-tin”, *Inst. Metals*, vol. 54, pp. 111–123.
14. Grabskii, M. V., 1975, “Strukturnaya sverhplastichnost’ metallov” [Structural superplasticity of metals] / perevod s pol’sk, *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 272 p.
15. Bochvar, A. A., 1948, “On different mechanisms of plasticity in metal alloys”, *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, otdelenie tekhnicheskikh nauk*, no. 5, pp. 649–653.
16. Bochvar, A. A., Sviderskaia, Z. A., 1945, “Phenomenon of superplasticity in zinc-aluminum alloys”, *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, otdelenie tekhnicheskikh nauk*, no. 9, pp. 821–824.
17. Novikov, I. I., 1986, “Teoriya termicheskoy obrabotki metallov” [Theory of heat treatment of metals], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 480 p.

18. Presniakov, A. A., 1959, "Sverhplastichnost' metallov i splavov" [Superplasticity of metals and alloys], *Nauka, Alma-Ata, Rossiya*, 203 p.
19. Backofen, W. A., Turner, G. R., Avery, D. H., 1964, "Superplasticity in an Al-Zn alloy" *Trans. Americ. Soc. Metals*, vol. 57, pp. 980–990.
20. Backofen, W. A., 1977, "Processy deformacii" [Deformation processes], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 288 p.
21. Langdon, T. G., 1994, "Superplasticity in advanced materials" *In proceedings of Int. Conf. on Superplasticity in Advanced Materials (ICSAM-94)*. – Switzerland, Germany, UK, USA. Trans. Tech. Publ.
22. Mikhlin, S. G., 1934, "Osnovnye uravneniya matematicheskoy teorii plastichnosti" [Basic equations of mathematical theory of plasticity], *Akademii Nauk SSSR, Leningrad*, 71 p.
23. Iliushin, A. A., 1948, "Plastichnost" [Plasticity], *Gostekhizdat, Moskva, Rossiya*, 376 p.
24. Iliushin, A. A., 1949, "Nekotorye osnovnye zadachi teorii plastichnosti" [Some basic problems of plasticity theory], *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, otделение tekhnicheskikh nauk*, no. 12.
25. Iliushin, A. A., 1950, "Zamechaniya o nekotorykh stat'yah, posvyashchennykh kritike teorii plastichnosti" [Remarks on some papers criticizing the theory of plasticity], *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, otделение tekhnicheskikh nauk*, no. 6, pp. 940-951.
26. Iliushin, A. A., 1963, "Plastichnost'. Osnovy obshchej matematicheskoy teorii" [Plasticity. Fundamentals of General mathematical theory], *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Moskva, Rossiya*, 271 p.
27. Iliushin, A. A., 1990, "Mekhanika sploshnoj sredy" [Continuum mechanics], *Moskovskii gosudarstvennyi universitet, Moskva, Rossiya*, 310 p.
28. Kaibyshev, O. A., 1975, "Plastichnost' i sverhplastichnost' metallov" [Plasticity and superplasticity of metals], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 279 p.
29. Kaibyshev, O. A., 1984, "Sverhplastichnost' promyshlennykh splavov" [Superplasticity of industrial alloys], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 264 p.
30. Kaibyshev, O. A., Valiev, R. Z., 1987, "Granicy zeren i svoystva metallov" [Grain boundaries and properties of metals], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 214 p.
31. Rabinovich, M. Kh., 1963, "Prochnost' i sverhprochnost' metallov" [Strength and super strength of metals], *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Moskva, Rossiya*, 200 p.
32. Rabinovich, M. Kh., 1968, "Prochnost', temperatura, vremya" [Strength, temperature, time], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 160 p.
33. Rabotnov, U. N., 1966, "Polzuchest' ehlementov konstrukcij" [Creep of structural elements], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 752 p.
34. Rabotnov, U. N., 1979, "Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela" [Mechanics of deformable solids], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 744 p.
35. Shorshorov, M. Kh., Tikhonov, A. S., Bulat, S. I., et al., 1973, "Sverhplastichnost' metallicheskih materialov" [Superplasticity of metal materials], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 220 p.

36. Tikhonov, A. S., 1978, "Effekt sverhplastichnosti metallov i splavov" [Effect of superplasticity of metals and alloys], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 142 p.
37. Cmirnov, O. M., 1979, "Effekt sverhplastichnosti metallov i splavov" [Treatment of metals by pressure in a state of superplasticity], *Mashinostroenie, Moskva, Rossiya*, 184 p.
38. Gokhfeld, D. A., Sadakov, O. S., 1984, "Plastichnost' i polzuchest' ehlementov konstrukcij pri povtornyh nagruzheniyah" [Plasticity and creep of structural elements under repeated loads], *Mashinostroenie, Moskva, Rossiya*, 256 p.
39. Pozdeev, A. A., Trusov, P. V., Niashin, U. I., 1986, "Bol'shie uprugoplasticheskie deformacii: teoriya, algoritmy, prilozheniya" [Large elastic-plastic deformations: theory, algorithms, applications], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 232 p.
40. Loitsianskii, L. G., 1987, "Mekhanika zhidkosti i gaza" [Fluid and gas mechanics], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 840 p.
41. Malinin, N. N., 1986, "Polzuchest' v obrabotke metallov" [Creep in metal processing], *Mashinostroenie, Moskva, Rossiya*, 216 p.
42. Parton, V. Z., 1990, "Mekhanika razrusheniya: Ot teorii k praktike" [Fracture mechanics: from theory to practice], *Nauka, Moskva, Rossiya*, 240 p.
43. Gvozdev, A. E., 1992, "Proizvodstva zagotovok bystrorezhushchego instrumenta v usloviyah sverhplastichnosti" [Production of blanks of the high-speed tool in the conditions of superplasticity], *Mashinostroenie, Moskva, Rossiya*, 176 p.
44. Frenkel, Ia. M., 1959, "Sobranie izbrannyh trudov" [Collection of selected works], *Akademii Nauk SSSR, Leningrad*, vol. 2, 470 p.
45. Landau, L. D., Lifshits, E. M., 1988, "Teoreticheskaya fizika. Gidrodinamika" [Theoretical physics. Hydrodynamics], *Nauka, Moskva, Rossiya*, vol. 6, 736 p.
46. Landau, L. D., Lifshits, E. M., 1987, "Teoreticheskaya fizika. Teoriya uprugosti" [Theoretical physics. Theory of elasticity], *Nauka, Moskva, Rossiya*, vol. 7, 248 p.
47. Polukhin, P. I., Gorelik, S. S., Vorontsov, V. K., 1982, "Fizicheskie osnovy plasticheskoy deformacii" [Physical basis of plastic deformation], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 584 p.
48. Vasserman, A. M., Danilkin, V. A., Korobov, O. S., et al., 1985, "Metody kontrolya i issledovaniya legkih splavov: Spravochnik" [Methods of control and research of light alloys: Handbook], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 510 p.
49. Devices and methods of physical metallurgy "Pribory i metody fizicheskogo metallovedeniya", *Mir, Moskva, Rossiya*, 1973, no. 1, 428 p., 1974, no. 2, 366 p.
50. Volynova, T. F., 1988, "Vysokomargancovistye stali i splavy" [High-manganese steels and alloys], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 341 p.
51. Bernshtein, M. L., 1977, "Struktura deformirovannyh metallov" [Structure of deformed metals], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 431 p.
52. Shtremel, M. A., 1997, "Prochnost' splavov. Deformaciya" [The strength of the alloys. Deformation], *MISIS, Moskva, Rossiya*, vol. 2, 527 p.

53. Shtremel, M. A., 1982, "Prochnost' splavov. Defekty reshetki" [The strength of the alloys. Lattice defects], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, vol.1, 278 p.
54. Guliaev, A. P., 1982, "Sverhplastichnost' stalej" [Superplasticity of steels], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, 56 p.
55. Novikov, I. I., Partnoi, V. K., 1981, "Sverhplastichnost' stalej s ul'tromelkim zernom" [Superplasticity of steels with ultrafine grain], *Metallurgiya, Moskva, Rossiya*, vol. 1, 168 p.
56. Gvozdev, A. E., Sergeev, N. N., Sergeev, A. N., et al., 2018, "Anomal'nye mekhanicheskie svoystva nekotoryh metallicheskih sistem" [Abnormal mechanical properties of some metal systems], *TulGU, Tula, Rossiya*, 149 p.
57. Shorshorov, M. Kh., Gvozdev, A. E., Sergeev, A. N., et al., 2018, "Modelirovanie processov resursosberegayushchej obrabotki slitkovykh, poroshkovykh, nanostrukturnykh i kompozicionnykh materialov" [Modeling of processes of resource-saving processing of ingot, powder, nanostructured and composite materials], *TulGU, Tula, Rossiya*, 359 p.
58. Gvozdev, A. E., Zhuravlev, G. M., Kuzovleva, O. V., 2018, "Osnovy formirovaniya sostoyaniya vysokoj deformacionnoj sposobnosti metallicheskih sistem" [Bases of formation of the state of high deformation ability of metal systems], *TulGU, Tula, Rossiya*, 382 p.
59. Shorshorov, M. Kh., Bazyk, A. S., Kazakov, M. V., 2018, "Sverhplastichnost' stalej i splavov i resursosberegayushchie tekhnologii processov obrabotki metallov davleniem" [Superplasticity of steels and alloys and resource-saving technologies of metal forming processes], *TulGU, Tula, Rossiya*, 158 p.
60. Gvozdev, A. E., Breki, A. D., Dorokhin, U. S., 2018, "Programmnyj kompleks rascheta moshchnosti sil, opredelyayushchih processy plasticheskogo deformirovaniya, poverhnostnogo formoizmeneniya i frikcionnogo vzaimodejstviya slitkovykh, poroshkovykh i nanokompozicionnykh metallicheskih sistem" [Software package for calculating the power of forces determining the processes of plastic deformation, surface shaping and friction interaction of ingot, powder and nanocomposite metal systems] / *Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM № 2018661010*.
61. Gvozdev, A. E., Starikov, N. E., Sergeev, N. N., 2018, "Osnovy resursosberegayushchih processov polucheniya bystrorezhushchego instrumenta" [Basics of resource-saving processes for obtaining high-speed tools], *TulGU, Tula, Rossiya*, 209 p.
62. Gvozdev, A. E., Starikov, N. E., Sergeev, N. N., 2018, "Tekhnologiya konstrukcionnykh, ehkspluatacionnykh i instrumental'nykh materialov" [The technology of construction, operation and tool materials], *TulGU, Tula, Rossiya*, 406 p.