



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3

Р.А. ВАСИН, д-р физ.-мат. наук, проф.  
заведующий лабораторией НИИ механики<sup>1</sup>  
E-mail: ra.vasin@yandex.ru

О.И. БЫЛЯ, канд. физ.-мат. наук, доц.  
исследователь<sup>2</sup>  
E-mail: olga.bylya@strathclyde.uk

П.Л. БЛЕКВЕЛЛ, д-р наук  
технический директор<sup>2</sup>  
E-mail: paul.blackwell@strath.ac.uk

П.В. ЧИСТЯКОВ, канд. физ.-мат. наук, доц.  
ведущий научный сотрудник НИИ механики<sup>1</sup>  
E-mail: chist206@yandex.ru

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Университет Стратклайда, г. Глазго, Великобритания

Поступила в редакцию 09.11.2016.

## ГОРЯЧЕЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СПЛАВОВ: ХАРАКТЕРНЫЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Дается краткий обзор исследований горячего деформирования сплавов применительно к задачам обработки металлов давлением. Рассмотрение типичных диаграмм деформирования показывает, что при высокотемпературном активном деформировании многие сплавы демонстрируют разупрочнение. Отмечается существенное отличие поведения сплавов в оптимальных условиях сверхпластичности и при невыполнении этих условий. Во втором случае наблюдается существенное преобразование микроструктуры сплава и соответствующее изменение его механических свойств. Излагаются два подхода к моделированию эволюции микроструктуры — независимое решение задач об определении механических свойств и структурных параметров или совместное их определение в рамках связанной постановки краевой задачи. Обсуждаются некоторые подходы к построению феноменологических определяющих соотношений, пригодных для моделирования технологических процессов. Отмечается важность классификации процессов термомеханического нагружения сплавов.*

**Ключевые слова:** сплавы, горячее деформирование, сверхпластичность, микроструктура, определяющие соотношения, моделирование, технологический процесс

**Введение.** Многочисленные технологические процессы обработки металлов давлением (ОМД) связаны с горячим деформированием сплавов. Применительно к этим процессам актуальной является проблема их оптимизации (в широком смысле слова) и обеспечения регламентированного качества получаемых изделий. Решение этой проблемы требует, в частности, эффективного математического

моделирования рассматриваемого технологического процесса, включая выбор определяющих соотношений (ОС) материала, грамотную постановку соответствующей краевой задачи и метод (алгоритм) ее решения. При этом во многих случаях ключевую роль играет использование *адекватных* ОС материалов.

В настоящей работе кратко обсуждается совокупность исследований, составляющих основу для

адекватного математического моделирования технологических процессов. Она включает выяснение (установление) характерных особенностей структурно-механического поведения сплавов при горячем деформировании и способов их учета при построении ОС; применительно к этим ОС развитие методов решения краевых задач, соответствующих технологическим процессам горячей ОМД. Отдельные аспекты названных исследований обсуждались в работах авторов настоящей статьи [1–11]; ссылки на публикации других авторов приводятся ниже по ходу изложения материала.

С методической точки зрения представляется удобным выделить из всех процессов горячего деформирования сплавов такие, которые отвечают состоянию структурной сверхпластичности (СП) материала. Напомним, что состояние СП реализуется в поликристаллических материалах с ультрамелкозернистой структурой только при определенных температурно-скоростных условиях деформирования (см., например, [12–14]). В оптимальных («идеальных») условиях СП деформирования сплавы демонстрируют высокую скоростную и температурную чувствительность, способность испытывать аномально большие деформации без нарушения сплошности, а также пониженное сопротивление деформации. Известно [13–16], что технологии, использующие явление СП, успешно применяются для получения изделий ответственного назначения из труднодеформируемых сплавов. Не останавливаясь на обсуждении технологий СП деформирования (их несомненных достоинств и трудностей реализации), отметим важное для дальнейшего изложения свойство СП — с механической точки зрения поведение материала в состоянии СП подобно течению нелинейно-вязкой жидкости. Таким образом, при анализе СП деформирования сплавов на качественном уровне можно использовать модели нелинейно-вязкой среды или (с учетом порогового напряжения СП) вязкопластической среды. Реальное поведение сплавов в технологических процессах горячей обработки давлением гораздо сложнее, поскольку обычно не удается обеспечить строгое выполнение условий реализации СП во всем объеме обрабатываемой заготовки в течение всего технологического процесса. Состояние и поведение сплавов в таких условиях естественно назвать «околосверхпластичностью»; в настоящее время этот термин широко используется и практически стал официальным (англ. *near superplasticity*). Несмотря на определенную близость условий деформирования (и на близость названий), поведение сплавов в состоянии околосверхпластичности существенно сложнее, «богаче», чем в состоянии оптимальной СП, — наблюдается заметное (и разнообразное в зависимости от истории термомеханического воздействия на материал) изменение микроструктуры, которое в свою очередь вли-

яет на механические свойства (поведение) сплава. В связи с этим более сложными, чем для СП, становятся и соответствующие ОС — они в явном виде (или косвенно — через специально вводимые внутренние переменные) содержат параметры, характеризующие эволюцию микроструктуры.

**Характерные механические свойства.** Основными экспериментальными данными, которые не только дают общее представление о механических свойствах материала, но и во многих вариантах ОС используются для их идентификации, обычно являются диаграммы деформирования.

При СП деформировании сплавов типичный вид диаграмм — как у упруго-идеально-пластического материала, только напряжение течения зависит от скорости деформации и температуры. Фактически в случае СП участок пластического течения может быть не строго горизонтальным, но, главное, наступает момент, когда материал начинает разупрочняться.

Оказывается, свойство разупрочнения характерно для горячего деформирования многих сплавов. В работе [11] приведены примеры диаграмм деформирования разнообразных сплавов и на основе обзора литературы сформулированы следующие выводы: «1<sup>0</sup> при высокотемпературном активном деформировании многие сплавы (титановые, никелевые, алюминиевые, стальные и др., однофазные и многофазные и т. д.), различающиеся и химическим составом, и фазовым, и структурным состоянием, демонстрируют разупрочнение;...3<sup>0</sup> вид диаграмм деформирования при наличии разупрочнения может быть разнообразным и по величине деформации, при которой напряжение достигает максимума, и по характеру изменения кривизны (в том числе с выпуклостью диаграммы вниз)». К настоящему времени сформировалась некоторая классификация диаграмм деформирования [11]; как важная механическая характеристика материала в ней выделяется нормированная величина касательного модуля на «падающем» участке. Эта величина играет существенную роль при исследовании потери устойчивости течения материала при горячем деформировании.

При изучении вязких свойств сплавов в процессах горячего деформирования теоретический интерес представляет оценка «памяти» материала к истории нагружения. В случае СП эксперименты демонстрируют слабую память на «выбросы» (порядка 10 %) скорости деформации — на этом основан метод определения скоростной чувствительности материала. Но оказалось, что при скачках скорости деформации в несколько раз или на порядок «память» об этом наблюдается на диаграмме деформирования; у сплавов с неподготовленной структурой указанный эффект проявляется заметнее и разнообразнее [1, 3, 4]. Отмеченные экспериментальные факты могут быть использованы при построении и аттестации ОС.

**Эволюция микроструктуры при горячем деформировании сплавов.** Одной из характерных особенностей поведения сплавов при горячем деформировании является существенное преобразование их микроструктуры. В отличие от холодного деформирования, при котором основным микроструктурным механизмом является дислокационный, при горячем деформировании сплавов наблюдается большое многообразие процессов, происходящих на микроуровне. Это и возврат, и рекристаллизация, и возможные фазовые переходы, и ряд других механизмов. И если большая часть накопленных дислокаций пропадает при отжиге, то микроструктура, сформировавшаяся в горячих процессах ОМД, сохраняется в полученных деталях, определяя их рабочие характеристики.

Таким образом, моделирование микроструктурных преобразований в горячих процессах ОМД становится важной проблемой для развития современных штамповочных технологий. Оно преследует две основные цели. Первая — прогнозирование получаемой микроструктуры и, соответственно, рабочих (функциональных) свойств детали. Вторая цель менее очевидна, но не менее важна. Так как микроструктура материала активно изменяется при горячем деформировании, механические свойства материала также существенно изменяются непосредственно в процессе изготовления детали. Одним из проявлений такого изменения механических свойств является деформационное разупрочнение, о котором говорилось выше. Так как набор действующих микроструктурных механизмов и результаты их работы существенно зависят от термо-механической истории нагружения материала, для создания достаточно адекватной феноменологической модели этих процессов одноосных лабораторных экспериментов, очевидно, недостаточно [7].

В соответствии с названными выше целями можно выделить два основных подхода к моделированию эволюции микроструктурных преобразований при конечно-элементном анализе процессов ОМД; эти подходы соответствуют двум принципиально разным постановкам краевой задачи МДТТ, соответствующей рассматриваемому технологическому процессу.

1. «Пост-процессорное» моделирование. Основной его целью является предсказание полученной микроструктуры. Название «пост-процессорное» означает, что в этом случае краевая задача несвязанная — отдельно решаются механическая задача и задача об определении структурных параметров. Сначала решается задача о деформировании заготовки на основе одной из обычных феноменологических моделей вязкопластичности (определение напряженно-деформированного состояния в материале заготовок). Затем истории изменения температуры, скорости деформации и деформации (иногда дополнительно эквивалентного и среднего напряжений,

реже полных тензоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций) используются как исходные данные для микроструктурных моделей [17, 18].

2. Совместное моделирование. В этом случае краевая задача формулируется как связанная (нельзя отдельно, независимо определить напряженно-деформированное состояние и структурные параметры материала), поскольку сами ОС материала включают параметры структурно-механического состояния. Основной целью является усовершенствование феноменологической модели материала за счет учета в ней его микроструктурных изменений; впрочем, окончательное структурное состояние в этом случае также является одним из результатов моделирования. Таким образом, в процессе конечно-элементного моделирования механическая задача решается совместно с микроструктурной [19, 7]. ОС, описывающие структурно-механические свойства материалов, разделяются на несколько видов по способу их построения и набору учитываемых параметров микроструктуры. Наиболее распространенные виды ОС — физические модели пластичности (кристаллическая пластичность, многоуровневые структурные модели) и феноменологические модели с внутренними переменными. В последнем случае (более применимом для реальных технологических процессов) внутренние переменные — это ограниченный набор параметров, которые характеризуют структурное состояние материала, но не обязательно соответствуют конкретным физическим характеристикам структуры [20].

С точки зрения моделирования собственно эволюции микроструктуры, разница между двумя подходами выражается, как правило, в выборе набора переменных — характеристик, используемых для отображения структурного состояния.

В случае пост-процессорного моделирования количество описательных характеристик в принципе ничем не ограничено. Например, при использовании так называемых физических моделей зачастую в качестве переменных используются количественные характеристики различных реальных физических объектов: индивидуальных зерен различных фаз, границ зерен, дислокаций и т. п., поведение которых описывается уравнениями, напрямую полученными в физике твердого тела. Однако следует отметить, что если предполагается последующая корреляция полученных результатов с ожидаемыми функциональными свойствами материала, этот список по-видимому должен быть ограниченным.

При совместном моделировании выбор комплекта внутренних переменных связан с рядом необходимых ограничений. Прежде всего, так как они будут входить в макроскопические ОС, описывающие поведение представительного объема, и сами они должны быть некими уже усредненными для этого представительного объема величинами.

нами (например, средний размер зерна, средняя плотность дислокаций, доля зерен определенного типа). Очевидно, использование формально усредненных величин не всегда эффективно, например, если материал состоит из двух типов зерен — допустим, мелких и крупных — их средний размер может не иметь физического значения. По этой причине более эффективной выглядит идея [20] построения уравнений с внутренними переменными. Примерами таких переменных могут служить широко используемый в теории ползучести и теории пластичности параметр поврежденности  $\omega$  или некая величина, соответствующая определенному классу микроструктуры [7]. Второе ограничение является чисто практическим — количество внутренних переменных должно быть сведено до необходимого минимума для успешного и устойчивого нахождения материальных констант, входящих в ОС, и использования полученной модели для моделирования реальных сложных процессов.

В приведенных выше соображениях о необходимости использовать в ОС ограниченное количество параметров, характеризующих структуру материала, не затрагивался вопрос, на основе какой идеи, какого принципа должен комплектоваться этот набор параметров. Этому вопросу, чрезвычайно важному и с теоретической точки зрения (построение и аттестация адекватных ОС), и с практической (накопление экспериментальных данных и численное моделирование конкретных технологических процессов), в литературе по горячему деформированию сплавов уделяется очень мало внимания. Точнее говоря, предлагаются полезные рекомендации для отдельных частных случаев (конкретная технология, конкретные сплавы), а не концептуальный подход. В качестве такового представляется естественным выбрать предложенный А.А. Ильюшиным [21] подход к классификации процессов (холодного) упругопластического деформирования (изображаемых траекториями в соответствующем пространстве деформаций) по степени их сложности. Этот подход сформулирован в рамках разработанной А.А. Ильюшиным теории упругопластических процессов [21, 22]. На основе этой теории им также был предложен [22, 23] оригинальный экспериментально-вычислительный метод СН-ЭВМ решения существенно нелинейных краевых задач механики. Составной частью этого метода является процедура классификации процессов деформирования. Как показали позднейшие исследования, идеология метода СН-ЭВМ применима к исследованию разнообразных термомеханических процессов (ТМП) реализуемых в статических и динамических краевых задачах [24]. Не останавливаясь на возможности конкретного применения метода СН-ЭВМ к решению задач горячей ОМД (публикаций на эту тему нет), отметим

еще одну особенность метода СН-ЭВМ — в процессе его использования создается банк данных (БД) о механических свойствах материала при реализации ТМП, которые имеют место при решении краевой задачи методом СН-ЭВМ. Этот факт послужил основой для формулировки концепции БД о структурно-механических свойствах материалов (металлов и сплавов). Полное изложение концепции и соответствующая литература представлены в работе [26], а вопрос об использовании такого БД при проектировании технологических процессов — в работе [25]. Суть концепции состоит в следующем:

- 1) функциональные (механические) свойства получаемого изделия обеспечиваются состоянием микроструктуры материала изделия;
- 2) все содержащиеся в БД сведения относятся только к материалу (то есть к его представительному объему в условиях однородного напряженно-деформированного состояния);
- 3) БД в идеале включает информацию о всех видах (классах) ТМП, характерных для исследуемых технологий ОМД.

Возвращаясь к проблеме классификации ТМП, имеющих место в реальных технологических процессах горячей ОМД, следует учесть, что конкретный ТМП в БД характеризуется не только траекторией деформаций, но и историей изменения температуры и скорости деформации, а также информацией об исходной микроструктуре. В этих условиях зачастую влияние вида траекторий деформаций может отойти на второй план, а на тип микроструктуры, получаемой в результате ТМП, повлияет в основном температурно-скоростной режим ТМП. С учетом этого обстоятельства можно рекомендовать построение БД и классификацию ТМП «в обратном направлении» — исходя не из механических характеристик (вид траекторий деформаций), а структурных. Используя накопленный в материаловедении огромный экспериментальный материал по установлению связи (корреляции) структурного состояния сплавов и их механических свойств, можно построить БД-2 (вторую часть БД), содержащий информацию об указанной связи между определенным типом (классом) микроструктуры и определенным набором (классом) механических свойств. Для построения первой части БД (БД-1) проводятся эксперименты с различными ТМП (плюс исходная структура); все ТМП, в конце которых получилась микроструктура одного и того же класса, считаются принадлежащими к одному классу ТМП. Большинство экспериментальных результатов подобного рода получено при одноосном нагружении. В последние годы благодаря развитию теории эксперимента и появлению все более мощных вычислительных комплексов стало возможным исследовать сложные ТМП при неоднородном деформировании материала в условиях существенно неоднородного напряженно-деформированного состояния.

Иногда в научно-технической литературе публикуются карты механизмов деформации в осях «температура — скорость деформации» при фиксированном значении деформации (см., например, [27]). Подобные карты можно, видимо, тоже использовать для классификации ТМП, но только следует иметь в виду, что на протяжении ТМП механизмы деформации могут меняться.

**Определяющие соотношения и численное моделирование.** При описании различных процессов горячего деформирования сплавов используемые ОС можно условно разделить на две группы — термопластичность и вязкопластичность. В исследовании процессов ОМД применяются обычно модели нелинейно вязкой среды (чаще всего для СП или иногда для околосверхпластичности) или вязкопластичности. В последнем случае простейшие ОС представляют собой модифицированные варианты теории течения или теории ползучести; параметры структуры, если необходимо, вычисляются дополнительно, отдельно (постпроцессорное моделирование эволюции микроструктуры).

Современные ОС для описания горячего деформирования сплавов представляют собой связанные модели структурно-механического поведения материала. Как вкратце уже говорилось выше, они могут включать уравнения, моделирующие эволюцию индивидуальных физических параметров микроструктуры [19]. Некоторые из этих параметров входят в соотношения связи напряжений и скоростей деформаций, которые обычно выбираются в форме уравнений теории течения с изотропным или трансляционно-изотропным (а по существу модифицированным изотропным) упрочнением. Варианты ОС названного типа различаются набором параметров структуры, включаемых в общие ОС.

Другой подход к формулировке «связанных» ОС чаще используется механиками и отличается тем, что в качестве характеристик структуры в ОС входят внутренние переменные, косвенным образом отражающие эволюцию микроструктуры. Уравнения, задающие общую форму связи напряжений и скоростей деформаций, в этом подходе часто берутся в форме соотношений теории ползучести, в которых используется понятие потенциальной поверхности (поверхности ползучести, пластического потенциала). Некоторые особенности численного моделирования процессов горячей ОМД рассмотрены в работах [7–9].

**Заключение.** 1. При численном моделировании процессов горячего деформирования сплавов возникают специфические проблемы, связанные с выбором адекватных ОС и соответствующего метода решения краевой задачи.

2. Для более эффективного построения адекватных ОС и оценки функциональных свойств изделий, получаемых при горячей обработке давлением сплавов, требуется разрабатывать класси-

фикацию термомеханических процессов и создавать банки данных о структурно-механических свойствах сплавов.

3. Для достаточно адекватного описания горячего деформирования сплавов следует строить упрощенные феноменологические ОС с минимальным количеством внутренних переменных, характеризующих структуру материала.

4. Следует разрабатывать адекватные критерии потери устойчивости процесса высокотемпературного деформирования.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-08-04281.*

#### Список использованных обозначений

БД — банк данных;  
ОМД — обработка металлов давлением;  
ОС — определяющие соотношения (= математическая модель) материала;  
СП — структурная сверхпластичность;  
ТМП — термомеханический процесс.

#### Список литературы

1. Механическое поведение титанового сплава Ti-6Al-4V с неподготовленной микроструктурой при скачкообразном изменении скорости деформирования в режиме сверхпластичности / С.С. Бхаттачария [и др.] // Изв. РАН. МТТ. — 2009. — № 6. — С. 168–177.
2. Development of a variant of scalar constitutive equations suitable for description of the near super-plastic regimes of deforming / K. Bhaskaran [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2012. — Vol. 110. — Pp. 163–169.
3. Experimental Study of the Mechanical Behavior of Materials under Transient Regimes of Superplastic Deforming / O.I. Bylya [et al.] // Materials Science Forum. — 2013. — Vol. 735. — Pp. 232–239.
4. Быля, О.И. Об аттестации некоторых вариантов теории сверхпластичности по экспериментам с немонотонно изменяющейся скоростью деформации / О.И. Быля, Р.А. Васин, П.В. Чистяков // Материалы докл. междунар. конф. «VIII Окуневские чтения». 25–28 июня 2013 г., Санкт-Петербург. — СПб.: Изд-во Балтийского гос. техн. ун-та. — 2013. — С. 91–93.
5. Bylya, O.I. Approach for the simulation of the active transformation of the microstructure of two-phase alloys in FEM of the simulation of technological chains in SPF / O.I. Bylya, R.A. Vasin, A.I. Pshenichnyuk // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. — 2014. — Vol. 45. — № 9. — Pp. 799–806.
6. Моделирование активной трансформации микроструктуры двухфазных Ti сплавов во время горячей деформации / О.И. Быля [и др.] // Письма о материалах. — 2014. — Т. 4, № 2. — С. 124–129.
7. Simulation of the material softening during hot metal forming / O.I. Bylya [et al.] // Archives of Metallurgy and Materials. — 2015. — Vol. 60. — № 3A. — Pp. 1887–1893.
8. Быля, О.И. О выборе определяющих соотношений для численного моделирования сплавов со сложной реологией / О.И. Быля, П.Л. Блеквэлл, Р.А. Васин // XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретич. и прикл. механики (Казань, 20–24 авг.): сб. тр. — Казань: Изд-во Казанского федерального ун-та. — 2015. — С. 653–655.
9. Bylya, O.I. The Mechanics of Superplastic Forming — How to Incorporate and Model Superplastic and Superplastic-Like Conditions / O.I. Bylya, R.A. Vasin, P.L. Blackwell // Superplasticity in Advanced Materials — ICSAM 2015: Materials Science Forum. — 2016. — Vol. 838–839. — Pp. 468–476.
10. Васин, Р.А. О некоторых особенностях моделирования технологических процессов, использующих сверхпластическую формовку / Р.А. Васин, О.И. Быля, П.Л. Блеквэлл //

- Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. — 2015. — № 4. — С. 291–295.
11. Васин, Р.А. О разупрочнении сплавов в процессе высокотемпературного деформирования / Р.А. Васин, О.И. Быля // Упругость и неупругость: сб. — М.: Изд-во Московского ун-та. — 2016. — С. 151–157.
  12. Кайбышев, О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов / О.А. Кайбышев. — М.: Металлургия. — 1984. — 264 с.
  13. Чумаченко, Е.Н. Сверхпластичность: материалы, теории, технологии / Е.Н. Чумаченко, О.М. Смирнов, М.А. Цепин; предисл. Г.Г. Малинецкого. — М.: КомКнига. — 2005. — 320 с.
  14. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии / Р.Р. Мулюков [и др.]; под ред. Р.Р. Мулюкова, Р.М. Имаева, А.А. Назарова, В.М. Имаева, М.Ф. Имаева. — М.: Наука. — 2014. — С. 284.
  15. Смирнов, О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности / О.М. Смирнов. — М.: Машиностроение. — 1979. — С. 184.
  16. Кайбышев, О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. — М.: Наука. — 2002. — 440 с.
  17. Recrystallization and grain growth in the nickel-based superalloy Allvac 718Plus / C. Sommitsch [et al.] // Int. J. Mater. Res. — 2009. — Vol. 100. — № 8. — Pp. 1088–1098.
  18. Charles Murgau, C. A model for Ti–6Al–4V microstructure evolution for arbitrary temperature changes, Modelling Simul / C. Charles Murgau, R. Pederson and L.E. Lindgren // Mater. Sci. Eng. 20 (2012) 055006 (23pp).
  19. Lin, J. Modelling of microstructure evolution in hot forming using unified constitutive equations / J. Lin, T.A. Dean // Journal of Materials Processing Technology. — 167 (2005). — Pp. 354–362.
  20. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов Ю.Н. — М.: Наука. — 1979. — 744 с.
  21. Ильюшин, А.А. О связи между напряжениями и малыми деформациями в механике сплошных сред / А.А. Ильюшин // Прикладная математика и механика. — 1954. — Т. 18, В. 6. — С. 641–666.
  22. Ильюшин, А.А. Пластичность. Основы общей математической теории / А.А. Ильюшин. — М.: Изд-во АН СССР. — 1963. — 271 с.
  23. Ильюшин, А.А. Метод СН-ЭВМ в теории пластичности / А.А. Ильюшин // Проблемы прикладной математики и механики: сб. — М.: Наука, 1971. — С. 166–178.
  24. Моссаковский, П.А. Развитие метода СН-ЭВМ Ильюшина применительно к краевым задачам динамической прочности / П.А. Моссаковский, Р.А. Васин, Ф.К. Антонов // Упругость и неупругость: материалы междунар. науч. симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвящ. 100-летию со дня рождения А.А. Ильюшина. Москва, 20–21 янв. 2011 г. — М.: Изд-во Московского ун-та, 2011. — С. 210–215.
  25. Ермаченко, А.Г. Об использовании банка данных о структурно-механических свойствах материалов при проектировании прогрессивных технологических процессов получения изделий повышенной надежности / А.Г. Ермаченко, Р.А. Васин, Ф.У. Еникеев // Матем. моделир. систем и процессов. — 2001. — № 9. — С. 20–32.
  26. Васин, Р.А. Теория упругопластических процессов и исследование структурно-механических свойств материалов / Р.А. Васин // Изв. РАН. Механика твердого тела. — 2011. — № 1. — С. 19–26.
  27. Sui, Feng-Li. Processing map for hot working of Inconel 718. Alloy / Feng-Li Sui, Li-Xia Xu, Li-Qing Chen, Xiang-Hua Liu // J. of materials processing technology. — 2011. — Vol. 211. — Pp. 433–440.

VASIN Rudolf A., D. Sc. in Phys.-Math., Prof.

Head of Laboratory, Institute of Mechanics<sup>1</sup>

E-mail: ra.vasin@yandex.ru

BYLYA Olga I., Ph. D. in Phys.-Math., Assoc. Prof.

Researcher<sup>2</sup>

E-mail: olga.bylya@strathclyde.uk

BLACKWELL Paul L., Ph. D.

Engineering Director<sup>2</sup>

E-mail: paul.blackwell@strath.ac.uk

CHISTYAKOV Petr V., Ph. D. in Phys.-Math., Assoc. Prof.

Researcher, Institute of Mechanics<sup>1</sup>

E-mail: chist206@yandex.ru

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

Received 09 November 2016.

## HOT DEFORMATION OF ALLOYS: CHARACTERISTIC STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES AND CONSTITUTIVE EQUATIONS USED FOR MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESSES

*A brief overview on the hot deformation of alloys applied to the hot working problems is provided. The analysis of the typical stress-strain diagram shows that at high temperature many alloys exhibits softening during active deformation. There is a significant difference between the behaviour of alloys under optimal conditions of superplasticity and under conditions where one or more parameters lie beyond the optimal limits. Herein, we present two approaches to the modelling of microstructure evolution — uncoupled and coupled. In the first case, the boundary-value mechanical problem is solved separately and obtained data is used as the input for the microstructural modelling. In the second case, transformation of the microstructure is directly involved in the constitutive relations via internal variables and*

the coupled system of equations. Some approaches to the construction of the coupled models are discussed. The importance of classification of deformation processes on the basis of the thermomechanical loading history is noted.

**Keywords:** alloy, hot deformation, superplasticity, microstructure, constitutive equations, modeling, workflow

## References

- Bhattacharya S.S., Bylya O.I., Vasin R.A. Mehanicheskoe povedenie titanovogo splava Ti-6Al-4V s nepodgotovlennoj mikrostrukturoj pri skachkoobraznom izmenenii skorosti deformirovaniya v rezhime sverhplastichnosti. [Mechanical behavior of titanium alloy Ti-6Al-4V with unprepared microstructure under jumpwise variations of the strain rate in the superplastic state]. *Izv. RAN. MTT* [Mechanics of Solids], 2009, vol. 44, no. 6, pp. 951–958.
- Bhaskaran K., Jha B.B., Mishra B.K., Bylya O.I., Sarandi M.K., Chistyakov P.V., Muravlev A.V., Vasin R.A. Development of a variant of scalar constitutive equations suitable for description of the near super-plastic regimes of deforming. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, no. 110, pp. 163–169.
- Bylya O.I., Vasin R.A., Chistyakov P.V., Muravlev A.V. Experimental Study of the Mechanical Behavior of Materials under Transient Regimes of Superplastic Deforming. *Materials Science Forum*, 2013, no. 735, pp. 232–239.
- Bylya O.I., Vasin R.A., Chistyakov P.V. Ob attestacii nekotoryh variantov teorii sverhplastichnosti po jeksperimentam s nemonotonno izmenjajushhejsja skorost'ju deformacii [On certification of some versions of the theory of superplasticity for experiments with of the strain rate nonmonotonically variable]. *Trudy. Mezhdun. konf. "Vosmye Okunevskie chtenija"* [Proc. Int. Conference "The Eighth Okunev's Readings"], St. Petersburg, Materials reports, 2013, pp. 91–93.
- Bylya O.I., Vasin R.A., Pshenichnyuk A.I. Approach for the simulation of the active transformation of the microstructure of two-phase alloys in FEM of the simulation of technological chains in SPF. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2014, vol. 45, no. 9, pp. 799–806.
- Bylya O.I., Pradhan B.K., Yakushina E.B., Blackwell P.L., Vasin R.A. Modelirovanie aktivnoj transformacii mikrostruktury dvuhfaznyh Ti splavov vo vremja gorjachej deformacii [Simulation of active transformation of the microstructure of two-phase Ti alloy during hot deformation]. *Pisma o materialah* [Letters on materials], 2014, vol. 4, no. 2, pp. 124–129.
- Bylya O.I., Sarangi M.K., Rohit M., Nayak A., Vasin R.A., Blackwell P.L. Simulation of the material softening during hot metal forming. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015, vol. 60, no. 3A, pp. 1887–1893.
- Bylya O.I., Blakwell P.L., Vasin R.A. O vybore opredeljajushhih sootnoshenij dlja chislenного modelirovaniya splavov so slozhnoj reologii [On the choice of the constitute equations for the numerical simulation of alloys with a complex rheology]. *Trudy XI Vserossijskij sezd po fundamentalnym problemam teoreticheskoi i prikladnoj mehaniki* [Proc. XI All-Russian Congress on fundamental issues of Theoretical and Applied Mechanics], Kazan, Izd-vo Kazanskogo (Privolzhskogo) federalnogo universiteta, 2015, pp. 653–655.
- Bylya O.I., Vasin R.A., Blackwell P.L. The Mechanics of Superplastic Forming – How to Incorporate and Model Superplastic and Superplastic-Like Conditions Superplasticity in Advanced Materials. *Proc. Sc Materials Science Forum*. 2016, vol. 838–839, pp. 468–476.
- Vasin R.A., Bylya O.I., Blackwell P.L. O nekotoryh osobennostjakh modelirovaniya tehnologicheskikh processov, ispol'zujushhih sverhplasticheskiju formovku [Some features of simulation of the technological processes using superplastic forming]. *Aktualnye voprosy mashinovedenija: sb. nauch. tr.* [Topical Issues of Mechanical Engineering: collection of scientific articles], Minsk, 2015, no. 4, pp. 291–295.
- Kaybyshev O.A. *Sverhplastichnost promyshlennyh splavov* [Superplasticity of industrial alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1984. 264 p.
- Vasin R.A., Bylya O.I. O razuprochnenii splavov v processe vysokotemperaturnogo deformirovaniya [About softening of the alloys during high temperature deformation]. *Sb. "Uprugost i neuprugost"* [Collection of articles "Elasticity and inelasticity"], Moscow, Izd-vo Moskovskogo un-ta, 2016, pp. 151–157.
- Chumachenko E.N., Smirnov O.M., Tsepin M.A., Malinetskiy G.G. *Sverhplastichnost: materialy, teorii, tehnologii* [Superplasticity: materials, theory, technology]. Moscow, KomKniga, 2005. 320 p.
- Mulyukov R.R., Imaev R.M., Nazarov A.A., Imaeva V.M., Imaeva M.F. *Sverhplastichnost ultramelkozernistykh splavov: jeksperiment, teorija, tehnologii* [The superplasticity of ultrafine alloys: experiment, theory, technology]. Moscow, Nauka, 2014, 284 p.
- Smirnov O.M. *Obrabotka metallov davleniem v sostojanii sverhplastichnosti* [Metal forming in superplasticity state]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 184 p.
- Kaybyshev O.A., Utyashev F.Z. *Sverhplastichnost, izmelchenie struktury i obrabotka trudnodeformiruemykh splavov* [Superplasticity, structure refinement and processing of hard-to-deform alloys]. Moscow, Nauka, 2002. 440 p.
- Sommitsch C., Huber D., Fredrik I.S., Mitsche S., Stockinger M., Buchmayr B. Recrystallization and grain growth in the nickel-based superalloy Allvac 718Plus. *Int. J. Mater. Res.*, 2009, vol. 100, no. 8, pp. 1088–1098.
- Charles Murgau C., Pederson R., Lindgren L.E. A model for Ti–6Al–4V microstructure evolution for arbitrary temperature changes. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 2012. 23 p.
- Lin J., Dean T.A. Modelling of microstructure evolution in hot forming using unified constitutive equations. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, no. 167, pp. 354–362.
- Rabotnov Yu.N. *Mehanika deformiruемого tverdogo tela* [Mechanics of a deformable solid body]. Moscow, Nauka, 1979. 744 p.
- Ilyushin A.A. O svyazi mezhdu naprjazhenijami i malymi deformacijami v mehanike sploshnyh sred [On the relationship between stress and small deformations in continuum mechanics]. *Prikladnaja matematika i mehanika* [Applied Mathematics and Mechanics], 1954, vol. 18, no. 6, pp. 641–666.
- Ilyushin A.A. *Plastichnost. Osnovy obshhej matematicheskoi teorii* [Plasticity. Fundamentals of general mathematical theory]. Moscow, AN USSR, 1963. 271 p.
- Ilyushin A.A. Metod SN-JeVM v teorii plastichnosti [SM EVM method in the theory of plasticity]. *Sb. "Problemy prikladnoj matematiki i mehaniki"* [Collection "Problems of Applied Mathematics and Mechanics"], Moscow, Nauka, 1971, pp. 166–178.
- Mossakovskiy P.A., Vasin R.A., Antonov F.K. Razvitie metoda SN-JeVM II'jushina primenitel'no k kraevym zadacham dinamicheskoi prochnosti [Ilyushin SM EVM method development applied to boundary value problems of dynamic strength]. *Materialy Mezhdun. nauchn. simp. po problemam mehaniki deformiruemykh tel, posvjashh. 100-letiju so dnja rozhdenija A.A. Ilyushina "Uprugost i neuprugost"* [Proc. Int. scientific symposium on problems of the mechanics of deformable bodies dedicated to the 100th anniversary of A.A. Ilyushin "Elasticity and inelasticity"].
- Ermachenko A.G., Vasin R.A., Enikeev F.U. Ob ispolzovanii banka dannyh o strukturno-mehaničeskikh svojstvah materialov pri proektirovanii progressivnyh tehnologicheskikh processov poluchenija izdelij povyshennoj nadjozhnosti [On the use of data bank on the structural and mechanical materials properties in design of progressive technological processes of manufacturing of high reliability products]. *Matem. Modelir. Sistem i processov* [Mathematical Modeling of Systems and Processes ], 2001, no. 9, pp. 20–32.
- Vasin R.A. Teorija uprugoplasticheskikh processov i issledovanie strukturno-mehaničeskikh svojstv materialov [The theory of elastoplastic processes and study of structure-mechanical properties of materials]. *Izv. RAN. Mehanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids], 2011, no. 1, pp. 15–20.
- Sui Feng-Li, Xu Li-Xia, Chen Li-Qing, Liu Xiang-Hua. Processing map for hot working of Inconel 718 alloy. *J. of materials processing technology*, 2011, no. 211, pp. 433–440.