

технічних рішень щодо зниження технологічної обрізи на пілігримовому стані, модернізація падаючих апаратів.

Ключові слова: труба, стан, пілігримова прокатка, падаючий апарат, затравка, пілігримова головка, пряма прошивка.

Considered are the peculiarities of the process of production of tubes for tube-rolling aggregates with pilger mill and prospects of its development. Among the priorities for the modernization and reconstruction of the unit 5-12» PJSC «INTERPIPE NTRP» are the following: transition to direct firmware shells from a round of concast billet in piercing mill, implementation of new technical solutions to reduce technological crops on pilger mill, modernization of the feeding apparatus.

Keywords: pipe mill, pilger rolling, the feeding apparatus, seed, pilger head, a direct firmware.

УДК 621.771: 669.01(07)

Е. Н. СОСЕНУШКИН, докт. техн. наук, проф., ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИЙ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

В статье рассмотрено формирование ультрамелкозернистых и наноструктурных конструкционных материалов с помощью способов интенсивной пластической деформации, создающих условия самоупорядочения хаотично организованной первоначальной зеренной структуры. Системно с позиций синергетики представлены уровни формирования структур конструкционных материалов.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, макро-, мезо- и микроуровни формирования структур.

Введение. Современный уровень развития машиностроения предъявляет повышенные требования к применяемым в конструкциях материалам, в особенности, к легким и прочным сплавам на основе Al и Ti, конструкционным сталям, а также труднодеформируемым сплавам. Характерна потребность в металлах и сплавах с высоким комплексом физико-механических свойств, которые позволят оптимизировать и усовершенствовать конструкции машин, механизмов и устройств, повысить производительность агрегатов, сроки их службы, а также уменьшить массу изделий и узлов, сократить затраты энергии на их привод, и, соответственно, снизить загрязнение окружающей среды. Высоким требованиям, благодаря наличию сильно измельченной структуры, отвечают субмикроструктурные (СМК), а также нанокристаллические (НК) материалы или наноматериалы. Под этими материалами принято понимать материалы, размер кристаллических зерен которых не превышают 100 нм, по крайней мере, в одном направлении. Классификация материалов по размеру частиц приведена на рис. [1]. Выделяют крупнозернистые материалы, СМК – материалы или ультрамелкозернистые, НК – материалы, а также материалы, размер зерен структуры которых, меньше 1 нм. Изучение материалов, обладающих наноструктурой, позволяет оценивать их свойства, а также эксплуатационные характеристики, которые имеют существенное отличие от крупнозернистых аналогов.

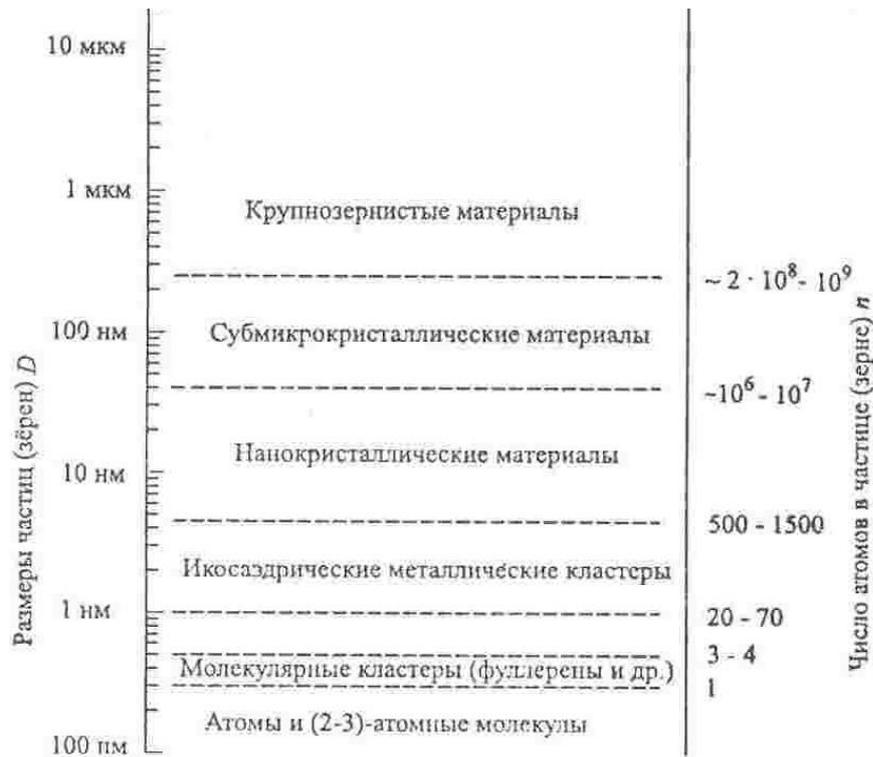


Рис. – Классификация материалов по размеру частиц (зерен)

О важности проблем, связанных с исследованиями в области нанотехнологий, говорит тот факт, что в стране кроме группы компаний, входящих в ОАО Роснано, 100% акций которого находится в собственности государстваи целью которого является коммерциализация нанотехнологических разработок, создана всероссийская общественная организация *Нанотехническое общество России*, объединяющая видных ученых и общественных деятелей. Вице-президентом общества является д.ф.-м.н., профессор Г.Г. Малинецкий, неустанно пропагандирующий новые, прорывные идеи и технологии в науке и образовании, одновременно являясь председателем редакционной коллегии серии изданий «Синергетика: от прошлого к будущему». В поддержку актуальности проблем, связанных с наноинженерией, выступают и решения правительства, в том числе вышедший в свет 07.07.2011 г. Указ Президента РФ №899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». В этом документе 6 пунктов критических технологий из 27 содержат упоминание о нанотехнологиях или наноматериалах в различных сферах научной и производственной деятельности. Одним из пунктов Указа является п.16 «Технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов», на наш взгляд, напрямую относящийся к машиностроению. Это стало возможным благодаря усилиям многих научных школ, в том числе и технологических, взоры которых уже многие годы обращены к проблеме создания конструкционных материалов с уникальными свойствами за счет реализации известных механизмов формирования в них наноструктур.

На глазах у нынешнего поколения ученых произошла закономерная вещь, в ходе научно-технического прогресса в руках исследователей появились новейшая регистрирующая аппаратура, уникальные технологические машины и оборудование, интеллектуальные средства испытаний, вычислений и измерений, расширившие возможности исследований макро-, микро- и наномира. Т.е. в ходе смены стандартов научных исследований возник новый уровень понимания технологических и металловедческих проблем, связанных с возможностями управления структурообразованием материалов, и прежние задачи представляются в новом свете и для них предлагаются новые решения [2]. Словами философов современное научное общество является катализатором смены парадигмы, которая обеспечит тематику для будущих исследований ученых и инженеров, в том числе занимающихся решением прикладных проблем, таких как наноинженерия в машиностроении.

В этом смысле прорывными технологиями получения конструкционных наноматериалов являются тиксоштамповка и способы интенсивной пластической деформации [3-8]. Посмотрим на процессы пластической деформации с позиций бурно развивающейся в последние десятилетия нелинейной науки о самоорганизации сложных систем под названием синергетика [9]. Синергетика (от греч. *synergetike* – содружество, коллективное поведение) – наука, изучающая системы, состоящие из многих подсистем самой различной природы; наука о самоорганизации простых систем и превращения хаоса в порядок. Под самоорганизацией понимается появление определенного порядка в однородной массе и последующего совершенствования и усложнения возникающей структуры, т.е. образование структуры происходит как за счет внешнего воздействия, так и за счет внутренней перестройки. Самоорганизация, по определению автора науки, немецкого физика Германа Хакена, – «спонтанное образование высокоупорядоченных структур из зародышей или даже из хаоса, спонтанный переход от неупорядоченного состояния к упорядоченному за счет совместного, кооперативного (синхронного) действия многих подсистем». Синергетика родом из физических дисциплин – термодинамики, радиофизики. Но ее идеи носят междисциплинарный характер. Они подводят базу под совершающийся в естествознании глобальный эволюционный синтез. Поэтому ученые в синергетике видят одну из важнейших составляющих современной научной картины мира. Предназначение синергетики, как науки, и об этом явно говорит ее автор, заключается в том, чтобы определить основные принципы, как из хаоса вырастают высокоорганизованные системы. Так, Г.Хакен в предисловии к своей книге «Синергетика», пишет: «Я назвал новую дисциплину синергетикой не только потому, что в ней исследуется совместное действие многих элементов систем, но и потому, что для нахождения общих принципов, управляющих самоорганизацией, необходимо кооперирование многих различных дисциплин».

Однако вернемся к вопросам прикладным, связанным с технологиями получения конструкционных наноматериалов. Создавая условия для перехода

металла в пластическое состояние, умело используя сочетания траекторий деформирования, управляя размерами очагов деформации и термомеханическими режимами, исследователь создает необходимые условия как фазовых превращений, так и направленной упорядоченности в хаотическом расположении зерен в ходе фрагментации структур. Т.е. основываясь на законах механики сплошных сред [10] и включая различные механизмы пластической деформации [11], удастся вызвать в металле необходимый отклик в виде самоупорядоченности структур на разных этапах деформирования, что неразрывно связано с синергетическим подходом.

Новизна синергетического подхода заключается в следующем [9, 12]. Хаос, в основном выступая как разрушитель, в нашем случае созидает. Понятие «хаос» оказалось гораздо более глубоким, чем представлялось ранее. Поэтому наряду с понятием «хаос» появилось определение «беспорядок», как нарушенный порядок. Хаотическое состояние содержит в себе неопределенность – вероятность и случайность, которые описываются при помощи понятий информации и энтропии. Одной из причин, обусловивших использование синергетического подхода, – необходимость при решении ряда задач науки и техники анализировать сложные процессы различной природы, используя при этом новые математические методы.

Современная наука, как утверждают авторы [12], все чаще формулирует свои закономерности, обращаясь к более богатому и сложному миру нелинейных математических моделей. Новым инструментом изучения нелинейных моделей стал вычислительный эксперимент [12-15]. Ученые получили возможность «проиграть» модель изучаемого процесса во многих вариантах, используя мощные ЭВМ. И что особенно важно – вычислительный эксперимент может привести к открытию новых явлений. Для этого нужны понятия, подходы, обобщения, которые отражают важнейшие общие черты исследуемых явлений и помогают построить их адекватные математические модели [9, 12, 15-18]. Все это также стало мощным стимулом развития синергетики.

В синергетике широко используют уравнения в частных производных. Эти уравнения – инструмент исследования нестационарных процессов, в которых изучаемые величины могут изменяться не только во времени, но и в пространстве. Разрабатываться он начал два века назад в связи с необходимостью решения задач гидродинамики и механики сплошных сред. Наиболее простыми и детально изученными являются линейные уравнения в частных производных [12].

Обратимся к механике сплошной среды [10], в некоторых разделах которой основополагающими являются дифференциальные уравнения равновесия в частных производных. Здесь также прослеживается синергетический подход.

Цель исследований, постановка проблемы. Дать научное обоснование с позиций синергетики и выявить особенности формирования структур на различных масштабных уровнях пластической деформации.

Материалы исследований масштабных уровней пластической деформации. Макроскопический масштабный уровень для поликристаллических материалов рассматривают в отношении всего деформируемого тела или его выделенного объема. Минимальные макроскопические размеры l_{imin} для объемного тела обычно принимают не менее $10d_c$, где d_c – средний размер зерен [2]. Это означает, что средние свойства материала в любом выбранном объеме тела, ограниченном радиусом не менее $5d_c$ будут примерно одинаковыми и характерными для всего тела в целом. Осреднение свойств на макроуровне позволяет рассматривать кристаллическое тело как сплошную среду с постоянной плотностью, состоящую из материальных точек с бесконечно малыми размерами, а его деформированное состояние – как результат относительных перемещений таких точек, определяемый методами механики сплошных сред [10].

При анализе деформированного состояния материальную точку с окрестностями представляют в виде куба с ребром равным dx_i , где индекс i – принимает значения 1, 2, 3 для главной трехмерной пространственной системы координат [19]. На площадках куба действуют напряжения, приводящие к изменению его размеров и формы. Деформация в бесконечно малой окрестности материальной точки описывается симметричным относительно главной диагонали тензором деформаций. Компоненты тензора, расположенные на главной диагонали, характеризуют относительную степень растяжения и/или сжатия линейных размеров материальной точки. Оба индекса у осевых компонент деформации принимают одинаковыми и из значения определяют как $\varepsilon_{ii} = \Delta(dx_i)/dx_i$, где Δ – приращение или уменьшение длины ребра dx_i куба при деформации. Остальные 6 компонент имеют неодинаковые индексы и характеризуют изменение углов при деформации изначально прямых углов между смежными гранями кубического элемента и их называют деформациями сдвига [2, 5, 10, 11, 19, 20].

С учетом симметричности тензора и условия несжимаемости деформируемого тела, число независимых компонент, полностью определяющих деформированное состояние в материальной точке, равно 5. Если в каждой материальной точке тела тензоры деформации равны, т.е. равны соответствующие компоненты тензоров, то деформация является однородной. Как правило, большие деформации, имеющие место при интенсивной пластической деформации, неоднородны [3, 4, 11, 19].

На практике расчет тензорных полей деформации, требующий применения специальных компьютерных программ, сложен и неудобен для анализа. Поэтому деформированное состояние материала удобно оценивать скалярной величиной истинной степени деформации – с точностью до постоянной, равной корню квадратному из второго инварианта тензора деформации.

Для измельчения структуры большое значение имеет применяемая схема деформирования [11, 19, 20], зависящая от схемы нагружения,

предопределяющей траекторию деформации материала. По длине траектории оценивают степень деформации, по кривизне – характер процесса [2, 3, 10, 20].

Траектория с малой кривизной свойственна монотонным процессам, в которых главная ось тензора деформации (след тензора) не поворачивается относительно координатных осей, связанных с деформируемым образцом. С увеличением кривизны или изломов траектории немонотонность возрастает. В теории обработки металлов давлением к немонотонным и существенно немонотонным относят такие процессы, в которых угол между направлениями деформирования в двух последовательных проходах меняется соответственно на 90° и 180° [2, 10, 20].

Строго говоря, к монотонным относят только голономные процессы, отличающиеся тем, что в них напряжение течения материала не зависит от скорости деформирования. Пластическое течение кристаллических материалов даже при простейших схемах деформирования – процесс неголономный [2, 3]. Например, если процесс растяжения металлического образца остановить, а затем вновь продолжить, т.е. снизить скорость до нуля, а затем восстановить прежнюю, то зависимость напряжения течения от деформации при повторном напряжении будет иметь иную форму кривой по сравнению с первоначальной. По этой причине все многопереходные процессы в ОМД являются немонотонными. Однако, в обычных процессах деформирования, таких как прямое прессование, прокатка и волочение заготовка вытягивается в одном направлении – вдоль продольной оси, и в этом случае повороты главной оси тензора деформации относительно этого направления незначительны, что позволяет отнести эти процессы к квазимоноотонным. Вследствие постоянства направления удлинения образца в квазимоноотонных процессах угол между напряжением и направлением сдвига становится малым, а фактор Шмидта – косинус этого угла – большим. В металлах при квазимоноотонной деформации образуется ярко выраженная аксиальная текстура и, преимущественно, формируются мелкие субзерна, а не зерна [2, 3, 21].

Способы интенсивной пластической деформации, такие как кручение под высоким квазигидростатическим давлением [4], равноканальное угловое прессование (РКУП) [5], всесторонняя ковка [11], винтовая экструзия [7, 22] и другие – это примеры немонотонных процессов деформирования. В этих способах инструментом активно задается переменная по величине и направлению скорость деформирования, соответственно, изменяется направление деформирования материала и положение следа тензора деформации по отношению к системе координат, связанной с заготовкой. Течение материала в этих условиях приобретает ротационный («вихревой») характер. Изменение направления деформирования приводит к преимущественному по сравнению с квазимоноотонными процессами формированию зерен, а не субзерен [2, 3, 21, 23].

Существенное влияние на измельчение структуры оказывают особенности реализуемой механической схемы деформации [11, 19, 20].

Для того чтобы зерна деформировались так же, как и образец в целом, необходимо наличие в каждом из них пяти независимых систем скольжения дислокаций [10]. Однако в поликристаллах кристаллические решетки соседних зерен развернуты на большие углы относительно друг друга. Вследствие этого в подавляющем большинстве случаев одновременно работают одна или две, реже три или четыре системы скольжения дислокаций. Это приводит к возникновению скоплений дислокаций в приграничных областях зерен и повышению внутренних напряжений в деформируемом металле. Необходимое для продолжения деформации изменение структуры осуществляется путем перестройки скоплений дислокаций в малоугловые границы, приводящих к образованию областей разориентации, называемых фрагментами и вследствие возникновения между фрагментами поворотов, свидетельством которых являются изменения текстурных плотностей [2]. С точки зрения развития пластической деформации фрагментация – это процесс, в результате которого на месте исходных зерен образуется большое количество небольших по размерам малоугловых областей разориентации. При фрагментации происходит замена множества (протяженности) большеугловых границ зерен, непреодолимых для дислокаций, большим множеством малоугловых границ, через которые дислокации могут проходить. Явление фрагментации структуры и образование мелких зерен обусловлены эволюцией дефектов кристаллической структуры рассматриваемых на микро и мезоуровнях [3].

Микроскопический уровень. Микроструктура металлических материалов характеризуется распределением по объему зерен – кристаллитов микродефектов. К таким дефектам, прежде всего, относят линейные дефекты – дислокации, а также планарные дефекты – дефекты упаковки, границы зерен и фаз. В двух поперечных направлениях размеры дислокационной линии соизмеримы с периодом кристаллической решетки, а её длина на порядки превосходит период и может достигать размера зерна. Протяженность границ в двух направлениях в несколько раз больше размеров обособляемых ими зерен и фаз, при этом толщина границ составляет всего $1 \div 3$ межатомных расстояния [3].

Количественные оценки масштабов микроуровня в разных работах отличаются. Например, в [21] микроуровень характеризуют диапазоном $\sqrt{\rho} \ll 1 \leq d$, где ρ – скалярная плотность дислокаций, d – размер зерна, $\sqrt{\rho} - 100b - 10^{-8}$ м), а в работе [23] этот уровень ограничивают диапазоном размеров $(1 \div 30)b$ и объемом $(100 \div 1000)V_a$, где $V_a - b^3$ объем атома.

Очевидно, что в зависимости от размера зерен в металлах, который в общем случае может быть в пределах от нескольких десятков миллиметров до нескольких нанометров, верхняя граница микроуровня будет существенно различаться.

Так как дислокации являются наиболее важными дефектами микроструктуры, с эволюцией которых, связано измельчение зерен при деформации, то свободный пробег дислокаций – путь от места их возникновения до остановки на препятствиях, можно использовать для характеристики масштаба микроуровня. Свободный пробег дислокаций зависит

от химического и фазового состава, исходных размеров зерен, энергии дефектов упаковки, степени деформации. В предельном случае максимальный пробег дислокаций, как уже отмечено, ограничен расстоянием между большеугловыми границами, т.е. размером зерен, а минимальный пробег – расстоянием от места возникновения до неподвижного скопления дислокаций [2]. Хотя в том и другом случае перемещения дислокаций на порядки превосходят межатомные расстояния, тем не менее, в сильно деформированном состоянии металла, где возникает много малоподвижных скоплений дислокаций, их свободный пробег становится намного меньше, чем в исходном мало деформированном состоянии. Соответственно, с уменьшением расстояния свободного пробега дислокаций сужается и масштаб микроуровня. Более того, при больших плотностях дислокаций их поведение приобретает коллективный характер, и в этом случае рассматривают уже поведение не индивидуальных дислокаций, а их сильно взаимодействующих ансамблей, что изменяет механизм деформации. Масштабный уровень перемещения таких скоплений дислокаций рассматривают уже в промежуточном между макроскопическим и микроскопическим уровне – мезоуровне [3].

На микроуровне рассматривают относительные сдвиги зерен по разделяющим их границам, т.е. сдвиг в плоскости границы – зернограничное проскальзывание. Такие сдвиги существенны по сравнению с межатомными расстояниями и могут перемещать их друг относительно друга на расстояния, соизмеримые с размерами зерна, т.е. приводят к смене соседей. Для описания таких сдвигов используют в основном два подхода. В первом используют так называемые зернограничные дислокации (ЗГД) [2]. Во втором – вакансии, концентрация которых в границах зерен, особенно большеугловых с неупорядоченной структурой, существенно больше, чем объемах кристаллической решетки. В пределе измельчение зерен приводит к аморфизации металлов. В аморфизированном состоянии отсутствует упорядоченное кристаллическое расположение атомов и поэтому теряется смысл описывать его такими нарушениями, как дислокации. Представление сдвига по границам зерен, как перемещения ЗГД, оправдано для относительно больших размеров зерен, в границах которых плотность таких дислокаций еще не достигла предельной, оцениваемой значением порядка 10^8 м^{-1} [3, 6].

На микроуровне в соответствии с [2, 3] при интенсивной холодной деформации выделяются три стадии структурных изменений, в результате которых образуются зёрна с высокоугловыми границами общего типа:

- на начальном этапе деформации формируется ячеистая структура;
- с увеличением деформации происходит уменьшение толщины стенок ячеек и плотность дислокаций в них становится выше критической. Это приводит к развитию возврата. В результате слияния дислокаций противоположных знаков в стенках ячеек остаются избыточные внесённые дислокации двух знаков;
- при дальнейшем деформировании повышение плотности дислокаций с вектором Бюргерса, перпендикулярных границе, ведёт к увеличению их

разориентировок и превращению ячеек в зёрна. В то же время увеличение скользящих дислокаций повышает дальнедействующие поля упругих напряжений.

Сформированные таким образом границы зёрен являются сильно неравновесными. Вокруг них существуют области значительных искажений кристаллической решётки, вызванные полями упругих дальнедействующих напряжений, внесённых зернограничных дислокаций, часть которых (скользящие ЗГД) при своём движении приводят к зернограничному проскальзыванию и относительному смещению зёрен.

Мезоскопический уровень. При деформациях $\varepsilon \geq 0,2 \div 0,3$ на возникновение и перемещение отдельной дислокации существенное влияние оказывают внутренние напряжения, создаваемые скоплениями дислокаций, которые при таких деформациях преобразуются в новые формы – границы слабо ориентированных областей и различные коллективные ансамбли сильно взаимодействующих и взаимосвязанных дислокаций, рассматриваемых как мезодефекты. Характер перемещения мезодефектов отличается от перемещений дислокаций тем, что их движение носит некристаллографический характер и оставляет в кристаллическом материале след в виде новообразованной внутренней поверхности – полосовой границы [3].

На мезоуровне при интенсивном немономотонном деформировании количество пересечений полосовых структур нарастает в большей мере, чем при монотонном деформировании. Существенное различие в угловых ориентировках продольных и поперечных границ фрагментов расположенных в них, очевидно, способствует ускоренному переходу материала от полосовых структур к фрагментированным с нарастающими углами разориентировки [2].

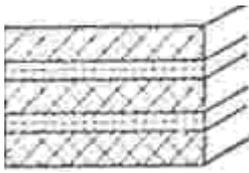
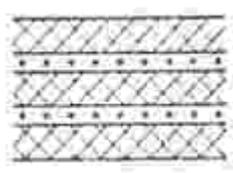
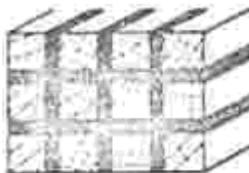
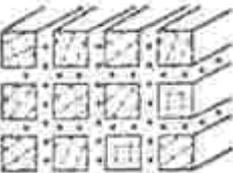
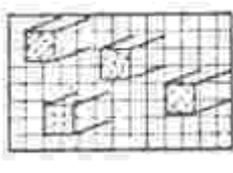
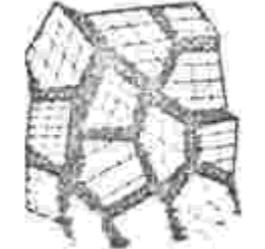
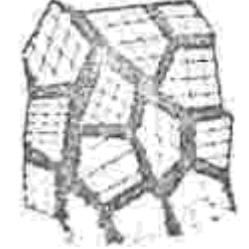
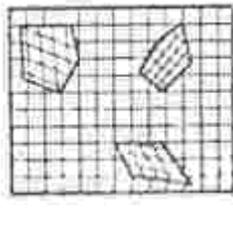
Характерная для мезоскопического уровня область в крупнозернистых материалах простирается от размера порядка 0,1 мкм до 1000 мкм. Столь широкий мезоскопический диапазон нередко разделяют на два интервала с границей между ними порядка нескольких десятков микрометров, что соответствует размерам таких структурных элементов как ячейка, блок, субзерно и других областей разориентации, возникающих в пределах деформируемых исходных зёрен. Максимальный размер второго интервала соответствует размерам зерна или группы зёрен, в пределах которых образуются деформационные полосы и полосы сдвига – мезополосы.

Масштабы мезоуровня можно определить по размерам образующихся при деформации описанных мезодефектов и величине их некристаллографических перемещений, которые в конкуренции с дислокационным сдвигом становятся основным механизмом деформирования.

При интенсивных деформациях различие в размерах между такими структурными элементами как дислокационные ячейки, блоки, микрополосы (в поперечном направлении) и зерна нивелируются вследствие уменьшения их размеров до значений $\sim 0,1$ мкм и менее. В конечном счете, формируется практически одинаковые в размерах зерна и субзерна с преобладанием доли большеугловых границ. Т.е. имевшие место в структуре мезодефекты фрагментируются и переходят на микро- и субмикроструктурные уровни.

Поэтому оценка масштаба мезоуровня в субмикроструктурных и нанокристаллических материалах по размерам структурных элементов, характерным для крупнозернистых состояний теряет смысл [21].

Таблица. Классификация консолидированных наноматериалов по составу, распределению и форме структурных составляющих

Форма	Однофазный состав	Многофазный состав		
		Статическое распределение		Матричное распределение
		Идентичные границы	Неидентичные границы	
Пластинчатая				
Столбчатая				
Равноосная				

Структурные уровни металлических материалов. В соответствии с [23] приведена классификация наноматериалов (табл.). В зависимости от химического состава, а также распределения фаз можно выделить однофазные, статические многофазные (с идентичными или неидентичными поверхностями раздела), а также матричные многофазные.

В зависимости от формы наноматериалы разделяют на пластинчатые, столбчатые и равноосные.

Выводы: 1. Дано обоснование формированию структур конструкционных материалов с позиций синергетики, как процесса самоупорядоченности в результате направленного действия применяемых способов интенсивной пластической деформации. 2. В зависимости от рассматриваемого масштабного уровня пластической деформации и, несмотря на идентичные механизмы деформации, конечный результат формирования структур на каждом из уровней будет разным, определяющим фактором которого является уровень накопленных деформаций в материале.

Список литературы: 1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: ФИЗМАГЛИТ, 2005. – 416с. 2. Утяшев Ф.З. Современные методы интенсивной пластической деформации. – Уфа: УГАТУ, 2008. – 313с. 3. Кайбышев О.Л., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. – М.: Наука, 2002. – 438с. 4. Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого

гидростатического давления на механические свойства материалов. – М.: Изд. Иностранной литературы, 1955. – 444с. **5.** *Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др.* Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Наука и техника, 1994. – 232с. **6.** *Латыши В.В., Салищев Г.А., Кандаров И.В., Жеребцов С.В., Измайлова Н.Ф., Половников В.М.* Эффективность применения интенсивной пластической деформации в технологическом процессе изготовления поволоков лопаток. // Кузнечно-штамповочное производство – Обработка металлов давлением. – 2012 – №8. – С.18-25. **7.** *Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г.* Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. – Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. – 87с. **8.** *Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Сосенушкин А.Е.* Совершенствование процессов интенсивной пластической деформации. // Вестник МГТУ «СТАНКИН» – 2012. – №1 (18). – С.22-25. **9.** *Малинецкий Г.Г.* Математические основы синергетики: Хаос, структуры, вычислительный эксперимент. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 312 с. **10.** *Ильющин А.А.* Механика сплошной среды. – М.: Изд. Моск. Ун-та, 1978. – 287 с. **11.** *Томсен Э.* Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши; пер. с англ. под ред. проф. Унксова. М.: Машиностроение, 1968. 504 с. **12.** *Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика – теория самоорганизации. Идеи, методы, перспективы. Серия: «Математика, кибернетика». – М.: Знание, 1983. – 64 с. **13.** *Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Сосенушкин А.Е.* Экспериментальная проверка адекватности компьютерного моделирования процесса равноканального углового прессования. / Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств. – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2009. – С.169-174. **14.** *Сосенушкин А.Е., Артеc А.Э., Сосенушкин Е.Н.* Математическое моделирование равноканального углового прессования. // Технология машиностроения. – №12. – 2011. – С.53-56. **15.** *Сосенушкин А.Е., Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А.* Моделирование кинематически возможных полей скоростей процесса углового прессования в пересекающихся каналах для расчета энерго-силовых параметров. / Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем. Вып. 15. Материалы II международной научной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем». Том 2. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013 – С.185-193. **16.** *Сосенушкин Е.Н., Сосенушкин А.Е.* Оценка силовых параметров и деформированного состояния заготовки при равноканальном угловом прессовании. / Труды международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». – СПб: Санкт-Петербургский ГТУ, 2011. – С.233-235. **17.** *Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Сосенушкин А.Е.* Верхняя оценка силовых и деформационных параметров равноканального углового прессования в параллельных каналах. // Известия Самарского научного центра РАН. Том 14. №4(5). 2012. С.1291-1294. **18.** *Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Климов В.Н., Сосенушкин А.Е., Сапронов И.Ю.* Влияние кинематики течения металла на эволюцию микроструктуры и свойства заготовок при равноканальном угловом прессовании. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. №11. 2012. С. 19-22. **19.** *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423с. **20.** *Ганаго О.А.* Критерий выбора механических схем деформации с развитыми сдвигами. / Сб. Статей Второго Китайско-советского семинара по теории и технологии кузнечно-штамповочного производства. – Пекин, 1990). – С.1-6. **21.** *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Пегас, 2000. – 272с. **22.** *Бейгельзимер Я.Е., Прокофьева О.В., Кулагин Р.Ю.* Пластичность субмикроструктурных материалов. / Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2009. – №2(21). – С. 115-118. **23.** *Андреевский Р.А.* Наноструктурные материалы. Уч. пособие для студентов вузов. – М.: ИЦ «Академия», 2005. – 192с.

Надійшла до редколегії 29.10.2013

УДК 621.771: 669.01(07)

Технологии конструкционных наноматериалов с позиций синергетического подхода // Сосенушкин Е. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42 (1015). – С. 156–167. Библиогр.: 23 назви.

У статті розглянуто формування ультрадрібнозернистих і наноструктурних конструкційних матеріалів за допомогою способів інтенсивної пластичної деформації, що створюють умови самовпорядкування хаотично організованою первісною зеренною структурою. Системно з позицій синергетики представлені рівні формування структур конструкційних матеріалів.

Ключові слова: інтенсивна пластична деформація, макро-, мезо-і мікрорівні формування структур.

In article formation of ultrafine-grained and nanostructural constructional materials by means of the ways of the intensive plastic deformation creating conditions of self-streamlining of chaotically organized initial zero structure is considered. Systemically from positions of synergetics levels of formation of structures of constructional materials are presented.

Keywords: intensive plastic deformation, macro – meso – and microlevels of formation of structures.

УДК 628.16:621.981.3

О. І. ТРИШЕВСЬКИЙ, докт. техн. наук, проф., ХНТУСГ
ім. П. Василенка, Харків;

М. В. САЛТАВЕЦЬ, інженер, ХНТУСГ ім. П. Василенка, Харків.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНКИ ЗУСИЛЬ НА ВАЛКИ ШТАБИ, ЩО ПРОКАТУЄТЬСЯ

Викладені результати досліджень щодо підвищення точності визначення зусиль на валках при прокатці штаби при використанні матеріалів математичної моделі прокатки для уточнення розподілу температури по перерізу штаби. Проведено порівняння отриманих результатів з даними експериментальних досліджень прокатки штаби на стані 2250 Алчевського металургійного комбінату.

Ключові слова: гаряча прокатка, штаба, математична модель, тепловий стан, розподіл фактичної температури, зусилля прокатки.

Вступ. Потреби ринку змусили виробників металопродукції скорегувати сортамент штаб, що прокатуються, в напрямку зменшення їх товщин. Інколи це приводило до аварії на прокатних станах (поломок валків) з суттєвими збитками. Поломки валків мали місце і на листових станах Алчевського металургійного комбінату (АМК) при спробі прокатати штаби меншої товщини і більшої ширини.

Аналіз останніх досліджень та літератури. Відомо, що під час пуску станів і освоєння сортаменту виробники мають аналогічні проблеми. В певній мірі це є наслідком того, що на сьогодні немає достатньо точної та надійної методики визначення силових параметрів процесу гарячої прокатки, повністю враховуючої усі аспекти процесу. Тому при проектуванні режиму прокатки, який повинен звести до мінімуму поломки обладнання, необхідно вірно оцінювати зусилля на валки.

Звичайно силу, що діє на валки, визначають за формулою [1]:

$$P = F \times p_{cp}, \quad (1)$$

де P – загальний тиск штаби на валки;

$F = B \times L_d$ – площа контакту;

B – ширина штаби;

L_d – довжина зони деформації;

$p_{cp} = n_\gamma n_\sigma \sigma_\phi$ – контактний тиск штаби на валки;