



РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.77:620.17

Стасовский Ю. Н.

СОВРЕМЕННЫЕ МИРОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ – БАЗИС ВОЗМОЖНОГО «ПРОРЫВА» ОТ «МАКРО» ЧЕРЕЗ «МИКРО» К «НАНО» В ПРОЦЕССАХ И МАШИНАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В начале XXI века в мире, с целью повышения конкурентоспособности и миниатюризации изделий, протекают такие процессы, как активное применение инновационных технологий в производственных процессах, создание прогрессивной эколого-технологической модели производства, уменьшение цикличности производства. Причем, наряду с миниатюризацией приборов уменьшаются и геометрические размеры используемой металлопродукции. В ряде случаев существующие массовые технологии нуждаются в кардинальном обновлении, поскольку они уже достигли своего теоретического предела и не могут дальше развиваться в направлении уменьшения размеров готовой продукции. Высокие требования к готовой продукции выдвигают в свою очередь также повышенные требования и к технологии ее изготовления на всех стадиях производства, а также к технологическому инструменту. Поэтому необходимо совершенствовать, на качественно новом уровне, традиционные и создавать новые технологии изготовления прецизионной металлопродукции. В первую очередь, необходимо создавать технологические схемы изготовления продукции с минимальным количеством повторений однотипных технологических операций производственного цикла. Тем не менее, нельзя забывать о качестве продукции и реальных возможностях технологического инструмента. Поэтому необходимым является получение исходной заготовки с размерами, максимально приближенными к размерам готового изделия и микроструктурой, которая обеспечит в дальнейшем необходимый уровень свойств в готовой продукции. К тому же, современное производство должно быть достаточно мобильным, т. е. переход с одного вида продукции на другой должны происходить очень быстро – это уменьшит время выполнения заказа и увеличит конкурентоспособность и производительность данного производства. С уменьшением геометрических размеров металлопродукции в сторону миниатюризации и выдвиганием более жестких требований, возникла ситуация практической невозможности ее изготовления с помощью существующего (макро-) оборудования и существующих технологий. Поэтому крайне необходимым становится создание нового прогрессивного (микро-) оборудования и соответствующих прецизионных технологий. Сегодня в мире особое место занимают наукоемкие технологии для областей производства с высоким уровнем добавленной стоимости, к которым относятся нанотехнологии. Их основные преимущества состоят в том, что они требуют небольших затрат энергии, материалов, не нуждаются в значительных производственных площадях. С другой стороны, их развитие вызывает потребность в высоком уровне подготовки ученых, инженеров и технических работников, а также особой организации труда [1].

Цель работы – на основе анализа современных мировых достижений показать возможность «прорыва» от «макро» через «микро» к «нано» в процессах и машинах обработки металлов давлением при изготовлении металлопродукции нового поколения.

Существующие мировые достижения и перспективные направления развития на современном этапе. 1) Большое внимание сейчас уделяют разработке новых материалов для инструмента

и уже достигнуты следующие результаты: сверхтвердый режущий инструмент нового поколения из нанопорошка кубического нитрида бора (наноКНБ); после ряда экспериментов с материалами с различным соотношением вольфрама, никеля и азота исследователям удалось получить нанокристаллический сплав, прочность которого оказалась существенно выше, чем у обычного никель-вольфрамового сплава; инструменты на основе наноструктурированного композиционного материала из диоксида циркония превосходят стальные аналоги в остроте и надёжности; создание промышленного производства высокоэффективного мелкорезущего инструмента с использованием самосмазывающего наноструктурированного твердого покрытия.

2) Второе важное направление – разработка новых материалов для производства металлопродукции с уникальными свойствами на основе традиционных металлов. Прирост прочностных свойств конструкционных материалов за последние десятилетия был обусловлен в основном разработкой сплавов с новым химическим и фазовым составом. Наноструктурные сплавы получают также методами термомеханической обработки прессовок из аморфных порошков. Полученные материалы тоже отличаются повышенными прочностными и другими физическими свойствами.

Для всех наноматериалов (так же как и для малых частиц) имеет место увеличение теплоемкости с уменьшением размера зерна, но наибольший ее прирост наблюдается для наноматериалов, полученных прессованием порошков. Коэффициент объемного термического расширения увеличивается с уменьшением размера зерна. Коэффициент граничной диффузии в наноматериалах значительно выше, чем в крупнозернистых, что позволяет их легировать нерастворимыми или слабо растворимыми при обычных условиях элементами за счет более развитой зеренной структуры. Итак, наноразмерные структуры конструкционных материалов открывают уникальные возможности для получения нового уровня свойств: высокой прочности, твердости, износостойкости при достаточно высокой пластичности. Разработка методов получения объемных (массивных) нанокристаллических заготовок с равномерной структурой по сечению заготовки, без пор, микротрещин и других дефектов структуры – актуальная задача, решение которой позволит расширить применение наноматериалов конструкционного назначения. В последние годы наметились новые пути повышения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования микро- и нано-кристаллической структуры:

– традиционные системы упрочнения конструкционных материалов имеют пределы, поскольку они одновременно снижают пластичность этих материалов и делают их хрупкими. При наноструктурировании конструкционных материалов не только существенно увеличивается их прочность, но и сохраняется пластичность. Например, их микротвердость в 2–7 раз выше, чем твердость крупнозернистых аналогов, причем это не зависит от метода получения материала. Прочность нанокристаллических материалов при растяжении в 1,5–2 раза выше, чем у крупнозернистых аналогов. Например, сталь 12Х18Н10Т с нанокристаллической структурой обладает хорошим соотношением прочности и пластичности. В отдельных случаях низкая пластичность нанокристаллических материалов вызывается, по-видимому, сложностью образования, размножения и движения дислокаций, а также наличием пор, микротрещин и включений в этих материалах. При уменьшении размера зерна от 10 мкм до 10 нм скорость износа никеля уменьшается от 1330 до 7,9 мкм³/мкм. Износостойкость алюминиевых сплавов с нанокристаллической структурой значительно выше, чем крупнозернистых;

– титан и другие сплавы нового поколения – это наномодифицированный материал, определяющийся наноструктурами, которые формируются специальными методами, и главное преимущество таких материалов состоит в их повышенной прочности при сохранении пластичности, вязкости, коррозионной устойчивости. Наноструктурный чистый титан, полученный методом интенсивного пластического деформирования (ИПД), имеет более высокие прочностные свойства ($\sigma_B = 1100$ МПа) и близкие значения пластичности ($\delta = 10$ %). При этом циклическая прочность повышается как в области многоциклового, так и в области малоциклового усталости по сравнению с крупнозернистым титаном. Такие сплавы нового поколения найдут широкое применение при создании атомных реакторов для подводных лодок, магистральных трубопроводов и других конструкций, работающих в экстремальных условиях;

– еще одно перспективное направление исследований – получение легких материалов высокой прочности, позволяющих увеличивать полезные нагрузки на транспорте и экономии топлива; новый алюминиевый сверхпрочный сплав на базе широко известной марки 7075 (сплав 7075 – самый прочный из всех алюминиевых сплавов: он включает в себя цинк и магний и широко используется в аэрокосмической промышленности);

– композиционный материал на основе наноструктурированных кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония, он обладает очень высокой трещиностойкостью и хорошим сочетанием триботехнических и прочностных характеристик, повышающих надёжность и ресурс работы узлов трения. Были созданы заготовки фильеров для получения проволоки, втулки подшипников скольжения, медицинские скальпели;

– разработана технология азотирования сплавов никеля и вольфрама (Ni-W). Образование нитридов приводит к заметному повышению износостойкости и твёрдости сплава. Нанокристаллические никель-вольфрамовые сплавы могут применяться для изготовления лопаток турбин, штампов горячейковки, подшипников;

– создана оригинальная наносталь, разработанная для повышения мощности ядерных реакторов на энергоблоках на 30–40 %. Новая разработка позволит увеличить проектный срок службы корпуса реактора стационарной АЭС до 100 лет и более. В тоже время, при сохранении проектного срока службы корпуса реактора в 60–80 лет, появляется возможность увеличить мощность энергоблока на 30–40 %. Сталь и технологии изготовления из нее крупногабаритных заготовок обеспечат производство стационарных атомных энергетических установок большой и средней мощности, плавучих АЭС, энергетических установок для ледоколов с принципиально новыми эксплуатационными характеристиками и длительным сроком эксплуатации. Использование усовершенствованной стали при изготовлении корпусов реакторов АЭС позволит существенно повысить доход от проектной выработки электроэнергии и снизить себестоимость 1 кВт-часа электроэнергии в расчете на 1 рубль капитальных вложений, уменьшить радиационную нагрузку на окружающую среду и снизить затраты на утилизацию отработавших ресурс корпусов реакторов за счет уменьшения количества утилизируемого металла;

– введение в состав алюминия фуллереновой формулы, которая представляет собой шар из 60 атомов углерода, в 3 раза повысило его прочность, при этом значительно снизив вес. Помимо этого, «оптимизированный» металл становится незаменимым при изготовлении сверхпроводящих кабелей, сохраняя при уменьшении в диаметре возможность выдерживать очень сильную силу тока;

– разработан состав экологически безопасной коррозионностойкой стали для ортопедической стоматологии взамен применяемых в настоящее время никельсодержащих сталей и сплавов;

– такие хрупкие материалы, как интерметаллиды, становятся пластичными при уменьшении размеров зерен ниже критических размеров, что можно объяснить наличием специфических механизмов зарождения и распространения микротрещин;

– наноструктурные материалы, обладающие повышенными прочностными и магнитными свойствами, можно получать и из аморфных сплавов посредством низкотемпературного отжига. Наноструктура может состоять только из кристаллитов или из смеси наноразмерных кристаллов и аморфной фазы;

– разработан и уже производится новый пластически деформируемый магнитотвердый сплав на основе системы Fe-Cr-Co с пониженным содержанием Co (7–8 %), не уступающий по своим магнитным свойствам ($B_r = 1,25–1,35$ Тл и $H_c = 42–47$ кА/м) наиболее распространенному на сегодняшний день литому сплаву ЮНДК 24;

– разработаны бронзы серии Supralloy, основным отличием которых от стандартных является величина зерна: она снижена с 8 до 3 мкм. Благодаря этому бронзы получили более высокую механическую прочность, отличную деформируемость при сохранении электропроводности. Выпускаются марки В 14, В 16 и В 18 соответственно с 4, 6 и 8 % олова в виде ленты толщиной 0,08 до 0,35 мм и стержней. Бронзы успешно заменяют в ряде случаев дорогостоящие специальные сплавы. Основные области применения - автомобилестроение и техника связи.

3) Следующее направление – применение процессов обработки металлов давлением для получения новых материалов. Многообразие методов порошковой металлургии – компактирование нанопорошков, ИПД и кристаллизация из аморфного состояния – обеспечивает широкие возможности для получения наноматериалов. На уплотнение дисперсных порошков значительное влияние оказывают такие параметры, как средний размер частиц, содержание примесей, состояние поверхности, форма частиц и способ прессования. Для прессования нанопорошков широко применяют одноосное прессование: статическое (в пресс-формах, штамповка), динамическое (магнитно-импульсное, взрывное) и вибрационное (ультразвуковое). Для получения высокоплотных однородных материалов используется всестороннее (изостатическое) прессование: гидростатическое, газостатическое, квазигидростатическое (в специальных пресс-формах под высоким давлением). Применяется также метод ИПД – кручение под высоким давлением. Перспективный способ получения наноматериалов – спекание нанопорошков под давлением. Методами горячего изостатического прессования и высокотемпературной газовой экструзии получены компакты из нанопорошков Ni, Fe и WC-Co с повышенными прочностными свойствами. Метод ИПД, заключающийся в обжатии с большими степенями деформации при относительно низких температурах (ниже $0,3-0,4 T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления материала) в условиях высоких приложенных давлений, позволяет получать объемные беспористые нанокристаллические металлы и сплавы. Обычные методы деформации – прокатка, волочение, прессование и др. – в конечном счете приводят к уменьшению поперечного сечения заготовки и не позволяют достигать больших степеней измельчения зерна. Нетрадиционные методы – кручение под гидростатическим давлением, равноканальное угловое прессование, знакопеременный изгиб – позволяют деформировать заготовку без изменения сечения и формы и достигать необходимых высоких степеней деформации и измельчения зерна. К настоящему времени нано- и субмикроструктурная структура в ходе ИПД получена в алюминии, железе, магнии, вольфраме, никеле, титане и их сплавах. Такая структура приводит к изменению физических и механических свойств (значительное повышение прочности при сохранении пластичности, повышение износостойкости, проявление высокоскоростной и низкотемпературной сверхпластичности). Ниже приведены примеры получения металлов с уникальными свойствами:

- при создании алюминиевых сплавов с наноструктурными элементами использовали следующие методы: ИПД при равноканальном угловом прессовании с формированием структуры с размером зерен $\sim(10-100)$ нм;

- в результате совмещения дисперсионного и наноструктурного (в результате ИПД) упрочнения достигается максимальный эффект. При этом пределы прочности и текучести при растяжении высокопрочного сплава типа В96Ц3 достигали 940 и 890 МПа соответственно. Имеются статистические данные, которые свидетельствуют, что уменьшение размера зерен в области наномасштаба в 10 раз увеличивает предел прочности в 3 раза;

- процесс изготовления наноматериала из мелкодисперсных порошков (нанопорошков) включает стадии прессования и спекания, что связано с повышением температуры – в результате нагрева кристаллы начинают расти, приводя к нарушению тонкой структуры материала;

- новый метод всесторонней изотермическойковки с поэтапным снижением температуры деформации, в основе которого лежит понимание фундаментальных закономерностей эволюции микроструктуры в металлах и сплавах в процессе деформации при повышенных температурах. Измельчение микроструктуры происходит благодаря развитию процессов динамической/постдинамической рекристаллизации. Метод включает многократное повторение определенной последовательности простых операций свободнойковки – осадки и протяжки, что не требует сложного дорогостоящего инструмента и позволяет использовать существующее технологическое и прессовое оборудование. Разработанный метод позволяет: получать объемные заготовки с однородной ультрамелкозернистой структурой (вплоть до $\sim 10-100$ нм), размер которых принципиально ограничивается только мощностью используемого оборудования; вести обработку материала в широком диапазоне температур ($T = 20-950$ °С) в изотермических

условиях за счет использования индукционно-нагреваемых плоских бойков из жаропрочного никелевого сплава, что дает возможность за счет комбинирования схем осадка-протяжка достигать однородной деформации и соответственно однородной ультрамелкозернистой структуры во всем объеме заготовки; внести в материал значительную энергию на единицу массы – намного больше, чем при использовании известных методов интенсивной пластической деформации, таких как кручение под давлением и равноканальное угловое прессование. Методом всесторонней изотермическойковки получены интерметаллиды с размером зерен 100–500 нм, обладающие высокой пластичностью при комнатной температуре (10–20 %) и сверхпластичностью при температурах на 200–400°C ниже, чем для аналогов с микронным размером зерен. Это открывает новые возможности для изготовления широкого ассортимента сложнопрофильных изделий методом изотермической штамповки при относительно низких температурах с использованием недорогого штампового инструмента. Кроме того, объемные наноструктурные заготовки из титанового сплава могут быть прокатаны при относительно низких температурах для получения листового материала. «Макро»-метод всестороннейковки является универсальным. Он позволяет получать объемные наноструктурные полуфабрикаты из различных металлов и сплавов, таких как магниевые, алюминиевые, титановые, медные сплавы, стали, включая труднодеформируемые никелевые жаропрочные и интерметаллидные сплавы. Разработанный метод послужил основой для создания новых ресурсосберегающих технологий, таких как: технология точной изотермической штамповки изделий; технология изотермической раскатки осесимметричных изделий из жаропрочных титановых, железных и никелевых сплавов; технология изготовления сферических сосудов высокого давления методом сверхпластической формовки и сварки давлением (СПФ/СД), интегральная технология изготовления многослойных пустотелых конструкций;

– предложен относительно простой способ повышения прочности алюминиевых сплавов. Материалом для исследования послужили стержни, выполненные из коммерчески доступного сплава 7075, который используется в аэрокосмической промышленности. Стержни были превращены в диски диаметром 20 и толщиной 0,8 мм, которые затем обрабатывались по методике, относящейся к группе ИПД, введенной в употребление в конце прошлого века. Диски располагали между двумя цилиндрическими наковальнями, которые создавали давление в 6 ГПа и вращались друг относительно друга. После 10 оборотов образцы вынимали и некоторое время выдерживали при комнатной температуре, чтобы они «постарели». При испытаниях выяснилось, что обработанный таким способом сплав имеет предел текучести примерно равный 1 ГПа. Эта величина сравнима с характеристиками сталей;

– развитие методов пластического деформирования металлов и сплавов в условиях всестороннего сжатия при криогенных температурах, позволяющие криодеформацией в условиях всестороннего сжатия получать структурные состояния, обеспечивающие металлу высокие механические характеристики в широкой области температур. Понижение температуры деформирования в области криогенных температур приводило к формированию в металле структур такой дисперсности при высокой равномерности распределения дефектов, которые в случае деформирования при более высоких температурах нереализуемы. Именно здесь проявляется большая разница высокотемпературного и низкотемпературного деформирования металла. Если в случае высокотемпературного деформирования металл, возвращенный в условия комнатной температуры, имеет уже стабильную структуру, устойчивое распределение дефектов и границ, то в случае низкотемпературного деформирования металл, перенесенный в условия комнатной температуры, фактически подвергается существенному отжигу.

4) Использование технологических и металлургических приемов. Работы по наноструктурному металлосведению проводятся в ряде российских университетов и институтов, например в московских МИСиС, МАТИ, Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, ОАО «Институт цветметобработки», Всероссийском НИИ авиационных материалов, Всероссийском институте легких сплавов, в екатеринбургских Институте физики

металлов РАН и техническом университете УГТУ УПИ, в томском Институте физики прочности и материаловедения РАН, в воронежском Техническом государственном университете, петербургском ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» и других. В ЗАО «Северсталь» ведутся поисковые работы по разработке и использованию специальных сталей для работы в экстремальных условиях и нагрузках, а также по влиянию нанопорошков тугоплавких соединений (нитридов, карбидов) на повышение механических и эксплуатационных свойств штрипсовых и конструкционных марок сталей. Приводим некоторые примеры реальных результатов:

- микролегирование переходными элементами (Sc, Zr, Hf и др.) с целью создания наноразмерных частиц фаз (Al_3Sc , Al_3Zr , Al_3Hf), обеспечивающих дополнительное упрочнение путем торможения движения дислокаций и сохранения нерекристаллизованной субзеренной структуры;

- многоступенчатая термическая обработка, в результате которой максимальный эффект (дисперсионное упрочнение – ДУ) достигается в результате оптимизации морфологии и объемной доли наноразмерных выделений метастабильных упрочняющих фаз типа Al_2Cu , Al_2CuMg , Mg_2Si , $MgZn_2$;

- создание термически стабильных наноразмерных композитных частиц метастабильных фаз в Al-Li сплавах (Al_3Li/Al_2Cu , Al_3Li/Al_3Zr , Al_3Li/Al_3Sc). Элементы наноструктуры могут занимать и относительно небольшой объем материала, обеспечивая при этом требуемый уровень свойств и выполняя основную функциональную нагрузку. Возможно формирование однофазных наноразмерных зерен, занимающих весь объем материала. Уменьшение размера зерен в области наномасштаба увеличивает прочностные свойства в несколько раз.

5) Реальные масштабные инновационные проекты в металлургическом производстве по получению металлопродукции нового поколения:

- на ОАО «Синарский трубный завод» (Россия) организовывается высокотехнологичное эффективное производство прецизионных нержавеющих высокоточных труб из нержавеющих сталей и сплавов. Улучшение их характеристик (прочность, пластичность, коррозионная стойкость, геометрические параметры, качество поверхности) при снижении себестоимости производства будет достигнуто за счет: модификации на наноуровне структуры стали и сплавов, возможности управления с высокой точностью деформационными и температурными параметрами обработки позволяет формировать в кристаллической решетке металла наноструктуры, внедрения на производстве станов холодной прокатки нового поколения, новых способов деформирования и технологических смазок. Они обеспечат формирование устойчивых ультратонких разделительных слоев в условиях высоких контактных напряжений при высоких степенях пластической деформации. Использование особо чистого водорода, полученного с применением наноструктурированных цеолитов, обеспечивает сохранение высоких свойств при термической обработке и сокращает ряд технологических операций. Благодаря высокому уровню основных характеристик, трубы найдут широкое применение в энергетическом и атомном комплексах, а также в области специального машиностроения, авиационной и космической отраслях;

- на ЗАО «Челябинский металлургический комбинат» (Россия) стартует масштабный проект по строительству нового рельсобалочного стана. Производственная мощность нового стана составит более 1 млн. тонн рельсов и фасонного проката в год. Главной продукцией стана станут высококачественные железнодорожные рельсы длиной до 100 метров. В процессе их выпуска будут применены самые передовые технологии по прокатке, закалке, правке, отделке и контролю качества. При их производстве планируется использовать нанотехнологии, что позволит значительно увеличить скорость движения поездов. Поверхностные слои рельсов обычно тонкие. Возможно, будут проводиться работы по упрочнению поверхностного слоя рельсов, что позволит им дольше стоять и меньше изнашиваться;

- в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» (Россия) организовывается производство стальной арматуры для железнодорожных шпал нового поколения на основе инновационной технологии

термодеформационного наноструктурирования. Стратегические планы по развитию российских железных дорог предполагают создание скоростного железнодорожного сообщения. Для реализации этой задачи требуются железнодорожные шпалы с особыми техническими свойствами. Производство таких шпал в настоящее время осуществляется с применением стержневой арматуры, изготовленной из легированной стали. Однако из-за дороговизны легирующих материалов себестоимость этой продукции высокая. Поэтому начата разработка арматуры повышенной гибкости и прочности для железобетонных шпал на основе нанотехнологий. Так, если в одной железобетонной шпале используется около 40 прутьев простой арматуры, то в новой шпале будет достаточно 4 прутьев новой арматуры. В результате специальной термической обработки обычной нелегированной высокоуглеродистой катанки можно получить те же прочностные свойства, которые достигаются лишь с использованием легирующих компонентов в стали. Разработки будут реализованы на новом оборудовании, приобретенном специально для этого проекта – волочильном стане и патентировочном агрегате. Кроме того, используя новую технологию, можно производить не только стержневую высокопрочную арматуру для шпал, но и другие виды продукции из высокоуглеродистой стали. Результатом станет серийное производство продукции, не имеющей аналогов в мире – прутковой арматуры диаметром до 10 мм с измельченной микроструктурой стали, обладающей уникальным комплексом свойств. Главное в них – высокая прочность и релаксационная стойкость;

– технология производства проката для труб нефтегазового комплекса, которая включает как создание новых химических составов сталей, так и совершенствование сталеплавно-го производства, непрерывной разливки и ковшовой обработки, термодеформационной обработки металла;

– разработана и внедряется технология интегрированного деформационно-термического производства высокопрочной горячекатаной листовой стали. Применение новой технологии обеспечивает получение уникального сочетания микроструктурных характеристик и механических свойств горячекатаных листов универсального и специального назначений, в том числе обладающих повышенными бронезащитными характеристиками;

– коррозионностойкие стали аустенитного и аустенитно-ферритного классов предназначены для получения высокопрочных изделий, таких как тончайшая проволока для упругих элементов и мединструмента, а также высоконагруженных деталей. Основным способом упрочняющей обработки для получения высокопрочного состояния является сочетание закалки на пересыщенный твердый раствор, холодной пластической деформации и окончательного старения. Разработанные стали отличаются высокой технологичностью, имеют высокую пластичность в исходном закаленном состоянии, что делает удобным проведение холодной пластической деформации с большими степенями обжатия, как волочением, так и другими способами.

– мелкосерийное производство сверхпрочных наноструктурированных пружин для различных отраслей промышленности началось в Ижевске на базе ООО «Научно-производственный центр «Пружина». Сверхпрочные пружины вызывают большой интерес потребителей. В основу производства пружин положена технология высокотемпературной термомеханической обработки металла, позволяющая создавать в нем наноразмерные структуры. За счет этого значительно улучшаются прочностные характеристики выпускаемых пружин. Основными областями применения продукции проекта станут железнодорожный транспорт (вагонные и локомотивные тележки), энергетика, подвески автомобилей и сельскохозяйственной техники, лифтовые системы;

6) Развитие прецизионного машиностроения, микротехнологий, что позволит в перспективе производить микро-оборудование, микро-инструмент для изготовления прецизионной металлопродукции и собственно реализовать прогрессивные микро-технологии. При переходе от макро- к микрообработке возникают ранее не существовавшие проблемы, например, необходимость принятия усиленных мер по соблюдению чистоты в цехе и на рабочем месте при манипулировании, по учету электростатики и по изменению свойств обрабатываемых деталей, размеры которых составляют иногда порядка 30 мкм. Кроме того, твердосплавное сверло

диаметром 0,5 мм и менее начинает изгибаться и величина его биения становится непредсказуемой. Аналогичные проблемы возникают и с фрезами. Ниже приведены перспективные области использования микро- и нанопереработки, микро- и нанотехнологии и микроинструменты:

- концевые микрофрезы диаметрами от 0,5 до 2 мм, предназначены для фрезерования ребер и пазов, полустойкой и чистой обработки, универсальная геометрия позволяет обрабатывать разнообразные материалы, от меди до закаленной стали при широкой гибкости;

- микросвёрла диаметром от 0,01 до 0,1 мм (отклонение по диаметру $\pm 0,0025$ мм) и длиной $10D$ (обычные) и $6D$ (укороченные);

- высокая точность обработки обеспечивается за счёт применения микропрецизионной инструментальной оснастки, позволяющей контролировать перемещение узлов станка в осевом и радиальном направлениях, инструментов с большими положительными передними углами и антивибрационных устройств, особенно эффективных при больших скорости резания и вылете инструмента;

- разработана технология Zero-Ideal, принципы которой используются в шлифовальных станках серии «Ultra-Planarization-Grinder», обеспечивающих получение зеркально чистой обработанной поверхности и «нулевые допуски». Основу этой технологии составляет бесконтактная высокопрецизионная гидростатическая измерительная система;

- микроинструменты с геометрически определённой режущей кромкой для токарной обработки и фрезерования при диаметре обработки от 0,2 мм. Подобные инструменты изготавливают методом порошковой металлургии из карбидов вольфрама и титана с небольшим количеством присадок, улучшающих прессуемость инструментального материала. Для микроинструментов с тончайшей геометрией пригодны так называемые ультратонкозернистые твёрдые сплавы с размером зёрен от 0,2 до 0,5 мкм. Необходимая геометрия режущей части инструмента (передний и задний углы, угол режущего клина) обеспечивают в процессе прецизионного шлифования;

- нанопрецизионная обработка высокотвёрдых материалов различных деталей на новых станках, обеспечивающих прецизионное позиционирование до ± 1 мкм, что обуславливает и точность обработки. Обработка возможна не менее чем по трем осям. Достигается высокое качество обработанной поверхности порядка $R_a = 0,041 \div 0,073$ мкм. Во многих случаях в процессе обработки поддерживается постоянная температура в зоне обработки. Управление процессами обработки осуществляется системами ЧПУ типа CNC;

- суперфинишная обработка мелких отверстий диаметром от 0,05 мм до 2 мм с допуском ± 1 мкм выполняется на проволочно-хонинговальном станке «Acuwire-L» фирмы «Schläfli». Отклонение от круглости 0,5 мкм, от концентричности ± 1 мкм; шероховатость обработанной поверхности $0,012 R_a$;

- круглошлифовальный станок модели S12 фирмы «Fritz Studer» для высокоэффективной обработки с точностью 0,00001 мм, что соответствует точности нанопереработки. Высокие точность и скорость обработки обеспечиваются за счёт новой комбинации привод/направляющие – линейные двигатели, которые обеспечивают скорость холостых перемещений до 30 м/мин при ускорении до 3 м/с^2 , а также за счёт уникальной станины из гранита с высокими демпфирующими свойствами. Термическая стабильность конструкции гарантировано сохраняется благодаря встроенным агрегатам охлаждения;

- измерительное устройство F25 системы СММ (с ЧПУ) с разрешающей способностью 2,5 нм (нанометра) для точного измерения геометрии мелких фасонных деталей;

- микропрецизионные обрабатывающие центры, гарантирующие точность обработки $\pm 0,002$ мм и шероховатость получаемых поверхностей $R_a < 0,2$ мкм.

7) Использование информационных технологий (ИТ):

- компьютерное проектирование наноструктур и новых материалов сегодня широко применяется в промышленно развитых странах. Основная задача, которая стоит перед разработчиками – получить программное обеспечение, которое позволит создавать реалистичные структурные модели материалов и сплавов с целью изучения их физических свойств.

Разработка позволит изучать свойства материалов в виртуальной среде еще до того, как они будут получены на практике. Она значительно упростит научные исследования в области материаловедения, а также найдет свое применение в реальном секторе экономики. Известно, что фактические свойства (плотность, твердость, прочность, деформируемость, температура плавления и т. д.) того или иного материала зависят от его атомной структуры. Даже если химический состав двух совершенно разных веществ идентичен. Компьютерное моделирование при проектировании новых веществ и сплавов с размером зерна менее 100–200 нанометров поможет ученым создавать материалы с совершенно радикальными свойствами. При этом усилия ученых не ограничатся одной лишь статической структурной моделью. В современный цифровой формат могут быть переведены многие технологические процессы обработки металлов давлением, термическая обработка, нанесение покрытий и т. д. Таким образом, уделяется большое внимание не только тому, каким может быть новый материал, но и тому, как его можно будет получить.

– в наше время компьютер позволяет виртуально спроектировать машину, виртуально ее испытать, передать виртуальную модель на завод, адаптировать ее под технологический процесс по виртуальным технологическим схемам и подавать информацию на станки, которые изготавливают ту или иную деталь.

– благодаря компьютеру срок от идеи до опытного образца сократился до шести месяцев – года. Кроме того, он позволяет рассмотреть не один вариант решений, а множество, посмотреть, какое из них ложится лучше на то оборудование, которое есть на заводе.

В этой статье приведены только часть тех вопросов, которые сейчас интенсивно прорабатываются и имеют уже реальный выход на практическое их применение. Но это только начальная стадия. Актуальной задачей на данном этапе развития является обобщить результаты и двигаться дальше.

Естественно, переход на нанотехнологии требует больших инвестиций в производство, приобретения нового современного и специального оборудования: например, растровых электронных и «туннельных» микроскопов с увеличением до 70 млн крат.

ВЫВОДЫ

Начало XXI века в глобальном масштабе характеризуется повышением конкурентоспособности и миниатюризации изделий за счет применения инновационных технологий в производственных процессах, создания прогрессивной эколого-технологической модели производства, уменьшения цикличности производства. Причем, наряду с миниатюризацией приборов уменьшаются и геометрические размеры используемой металлопродукции. Показано, что в ряде случаев существующие массовые технологии нуждаются в кардинальном обновлении, поскольку они уже достигли своего теоретического предела и не могут дальше развиваться в направлении уменьшения размеров готовой продукции. Высокие требования к готовой продукции выдвигают в свою очередь также повышенные требования и к технологии ее изготовления на всех стадиях производства, а также к технологическому инструменту. Поэтому возникла необходимость совершенствоваться, на качественно новом уровне, традиционные и создавать новые технологии изготовления прецизионной металлопродукции. Отмечено, что необходимо создавать, в первую очередь, технологические схемы изготовления продукции с минимальным количеством повторений однотипных технологических операций производственного цикла. При этом нельзя забывать о качестве продукции и реальных возможностях технологического инструмента. Поэтому необходимым является получение исходной заготовки с размерами, максимально приближенными к размерам готового изделия и микроструктурой, которая обеспечит в дальнейшем необходимый уровень свойств в готовой продукции. Кроме того, современное производство должно быть достаточно мобильным, т. е. переход с одного вида продукции на другой должны происходить очень быстро – это уменьшит время выполнения заказа и увеличит конкурентоспособность и производительность данного производства. С уменьшением геометрических размеров металлопродукции в сторону миниатюризации и выдвиганием

более жестких требований, возникла ситуация практической невозможности ее изготовления с помощью существующего (макро-) оборудования и существующих технологий. Поэтому крайне необходимым становится создание нового прогрессивного (микро-) оборудования и соответствующих прецизионных технологий. Сегодня в мире особое место занимают наукоемкие технологии для областей производства с высоким уровнем добавленной стоимости, к которым относятся нанотехнологии. С другой стороны, их развитие вызывает потребность в высоком уровне подготовки ученых, инженеров и технических работников, а также особой организации труда.

Приведены мировые достижения в различных направлениях (разработке новых материалов для инструмента и для производства металлопродукции с уникальными свойствами на основе традиционных металлов, применение процессов обработки металлов давлением для получения новых материалов, использование технологических и металлургических приемов, развитие прецизионного машиностроения и микротехнологий, реальные масштабные инновационные проекты в металлургическом производстве по получению металлопродукции нового поколения, использование информационных технологий и др.) и выявлены перспективные направления развития на современном этапе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стасовский Ю. Н. *Исследование мирового уровня, анализ традиционных технологий и разработка концептуальных основ перспективного применения нанотехнологий и наноматериалов при изготовлении прецизионной продукции* / Ю. Н. Стасовский, В. В. Страшна // *Металл и литье Украины*. – 2010. – № 3. – С. 8–14.
2. Белл Дж.Ф. *Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел* / Белл Дж.Ф.; [в 2 ч.; ч. II]. – М. : Наука, 1984. – 432 с.
3. Gil Sevillano J. *Large strain work hardening and textures* / Gil Sevillano J., van Houtte P., Aernoudt E. – *Progress in Materials Science*. – 1981. – № 25. – P. 135–141.
4. *Sources of Discrepancy Between The Flow Curves Determined in Torsion and Axisymmetric Tension and Compression Testing* / J. J. Jonas, G. R. Canova, S. C. Shrivastava, N. Christodoulou; Stanford. – 1981/ *Plasticity of metals at finite strain: theory, experiment, and computation. Proceedings of research workshop held at Stanford University. Div. Of Applied Mechanics*. – July 29. – 1981. Stanford. – P. 206–229.
5. Лецев И. В. *Получение нанокристаллических материалов при больших деформациях волочением и ИПД при высоких давлениях со сдвигом* / И. В. Лецев, А. А. Богатов. – Екатеринбург : УГТУ УПИ. – 2010. – С. 21–25.
6. Хаймович П. А. *Криодеформация металлов при всестороннем сжатии вопросы атомной науки и техники* / П. А. Хаймович // *Серия: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. – Харьков, 2006. – № 4. – С. 28–34.
7. Эрик Ландре. *Общие направления развития нанотехнологии до 2020 г* / Э. Ландре; пер. с англ. О. Ю. Санфириной // *Российские нанотехнологии*. – 2007. – Том 2. – № 34. – С. 815–819.
8. Дж. Уайтсайлес. *Нанотехнологии в ближайшем десятилетии: прогноз направления исследований* / Дж. Уайтсайлес, Д. Эйглер, Р. Андерс и др. [под ред. Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса; пер. с англ.]. – М. : Мир, 2002. – 292 с.
9. Benes J. *Маленькие детали – большие проблемы* / J. Benes // *American Machinist, США*. – 2006. – № 10. – Vol. 150. – С. 28–30, 32, ил. 3.
10. *Микропрецизионные обрабатывающие центры* // *Fertigung*. – 2006. – V. 33. – № 6. – С. 18–20, ил. 6.
11. *Исследования в области обработки миниатюрных деталей* // *Cutting Technology, США*. – 2005. – № 4. – V. 6. – С. 18–23.
12. *Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого межгосударственного сотрудничества* // *Материалы совместного совещания-семинара РАН и НАНУ*. – М. : Наука, 2009. – 357 с.

Стасовский Ю. Н. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: omd2004@i.ua

Статья поступила в редакцию 29.08.2011 г.