

## КРИОДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВСЕСТОРОННЕМ СЖАТИИ

**П.А. Хаймович**  
**ННЦ «Харьковский физико-технический институт»,**  
**г. Харьков, Украина**

Приведена информация о развитии методов пластического деформирования металлов и сплавов в условиях всестороннего сжатия при криогенных температурах как продолжение проводимых в ХФТИ в течение многих лет исследований в области прочности и пластичности металлов, претерпевших деформацию при низких температурах. Описаны методы и устройства, позволяющие криодеформацией в условиях всестороннего сжатия получать структурные состояния, обеспечивающие металлу высокие механические характеристики в широкой области температур. Предложены перспективы развития этих методов.

С середины 20-го века УФТИ (ныне ННЦ ХФТИ) был одним из основных научных центров, где исследовались свойства металлов и сплавов, подвергнутых деформированию при низких (криогенных) температурах. Большой цикл работ, выполненных И.А. Гиндиным с сотрудниками, выявил важнейшую роль фактора понижения температуры деформирования в область криогенных температур, что приводило к формированию в металле структур такой дисперсности при высокой равномерности распределения дефектов, которые в случае деформирования при более высоких температурах нереализуемы [1, 2]. Приведенные зависимости прочности меди от степени прокатки при разных температурах наглядно показывают роль понижения температуры деформирования в случае проведения его в области криогенных температур (рис. 1).

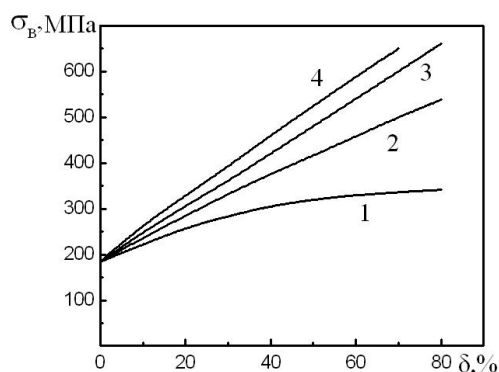


Рис. 1. Зависимость прочности меди при растяжении ( $T_{исп}=300\text{ K}$ ) от степени деформации прокаткой при 300 (1), 77 (2), 20,4(3) и 4,2(4) K

Эти работы были интересны не только тем, что отлично иллюстрировали роль фактора динамического возврата при пластическом деформировании металлов при различных температурах, но и выявили определяющую роль температуры деформирования в степени фрагментации структуры деформируемого металла. В одной из них [1] имеется наблюдение, очень важное для последующих исследований, что при одинаковом размере ячейки прочность образцов, соответствующая различным температурам

и степеням деформации, значительно различается. Это позволило авторам высказать предположение, что при одинаковом среднем размере ячейки возможна различная структура их границ, что зависит не только от степени, но и от температуры деформации.

Принципиальным ограничением на пути широкого применения низкотемпературного деформирования металлов как средства повышения их физико-механических характеристик являлось уменьшение их пластичности по мере понижения температуры проведения деформирования, а также отсутствие способов деформирования при низких температурах металлов с низкой пластичностью.

Примерно в это же время поиски путей воздействия на структуру металлов и, соответственно улучшения их свойств, шли и по другому пути. В ряде научных учреждений Союза интенсивно развивались работы по гидропрессованию металлов (гидроэкструзии) (рис. 2), в частности, в Донецком ФТИ, который много лет был головной организацией по развитию этих методов.

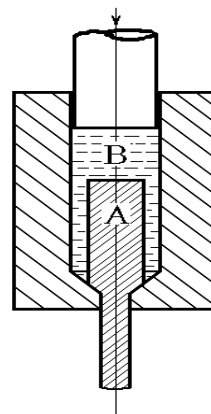


Рис. 2. Схема гидроэкструдирования (выдавливания материала под гидростатическим давлением): A - выдавливаемый материал, B – жидкость

Идея прессования жидкостью впервые была выдвинута Джеймсом Робертсоном в 1893 году [3], а осуществил первым этот вид деформирования Бри-

джмен [4]. В СССР первые эксперименты по гидропрессованию проводил в 1954 г. Курневич, большой комплекс исследований выполнен Л.Ф.Верещагиным и его сотрудниками [5]. Термин «гидроэкструзия» (Hydrostatic Extrusion) для прессования материалов жидкостью впервые появился в работе Пью [6], после чего вскоре стал общепризнанным. При этом виде воздействия важнейшую роль играет фактор наличия сил всестороннего равномерного сжатия при пластическом деформировании. Но специфика метода неслучайно в себе и ограничения: считалось естественным, что условия гидростатики для осуществления гидроэкструзии могут обеспечить только жидкие (с учетом реализуемого уровня давления) среды, что ограничивало круг этих сред жидкостями либо расплавами металлов. Так что и все работы по гидроэкструзии велись при комнатной либо повышенных температурах.

В статическом состоянии исследования свойств материалов в условиях всестороннего сжатия при низких (криогенных) температурах начали проводить уже в первой половине прошлого века. Одними из пионеров работ в этом направлении были Б.Г. Лазарев и Л.С. Кан, впервые предложившие беспоршневой метод получения высоких давлений при низких температурах [7], позволивший получить давление около 1600 атм при 4,2 К, причем создающей давление средой служил лед.

Поршневые методы создания высокого давления при низких температурах в случае статических исследований твердых тел позволяют значительно расширить диапазон давлений, однако тем более острым становится вопрос подбора передающей давление среды. Анализу таких сред было уделено большое внимание Дж. Стюартом [8], отмечавшим, что идеальная, передающая давление среда совершенно не должна иметь напряжений сдвига. В этом случае усилие одноосного сжатия от поршня передавалось бы как гидростатическое давление, но, естественно, ни одно твердое тело не может быть такой идеальной передающей давление средой уже потому, что по определению все твердые тела оказывают сопротивление сдвигу.

Тем не менее, Стюарт обозначил основные критерии, которыми должна обладать необходимая среда: низкой прочностью на сдвиг; при сдвиге среда должна испытывать пластическое течение, а не хрупкое разрушение; сжимаемость среды должна быть мала; среда должна быть химически инертна.

Круг сред, применяемых на тот момент при разных температурах и в разных диапазонах давлений, был довольно широк: пирофиллит и тальк, хлорид серебра и гексагональный нитрид бора, индий и графит. Определенные надежды возлагались на твердые водород и гелий, хотя большой помехой является их значительная сжимаемость. Но это все касается статических исследований. При несомненных успехах деятельности в этом направлении задачу осуществления пластического деформирования металлов и сплавов в условиях действия сил всестороннего сжатия при криогенных температурах еще предстояло решать.

Мостиком для перехода от традиционной (жидкостной) гидроэкструзии к методам, реализующим аналогичную схему распределения сил, действующих на выдавливаемую заготовку, но при низких температурах, стали работы, начатые 70-х годах прошлого века в лаборатории физики прочности и пластичности ХФТИ. Это были эксперименты по выдавливанию металлов при температурах ниже комнатной (вплоть до 20 К) [9] на металлах с ГЦК-решеткой (свинце, алюминии, меди), причем основной объем информации был получен именно на меди. Осуществлялись они на специально разработанном и изготовленном в ХФТИ низкотемпературном прессе, сконструированном по классической схеме погруженной в сосуд с хладагентом упорной колонны с пропущенной внутри нее тягой (рис. 3) [10].

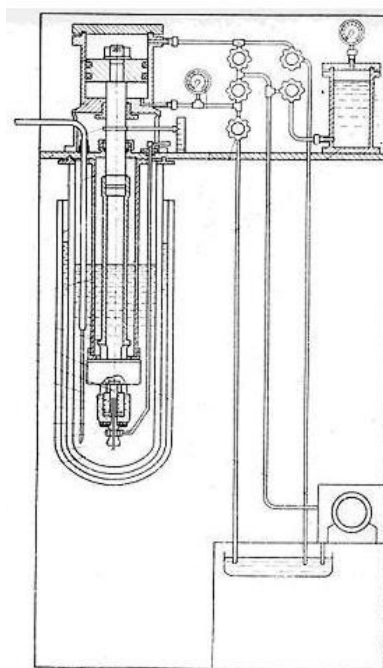


Рис. 3. Специализированный низкотемпературный пресс

Следует остановиться на некоторых из полученных при этих исследованиях результатах. В области малых и средних степеней деформации  $\delta$  ( $\delta = [(D_0^2 - d^2)/D_0^2] \cdot 100\%$ ) меди наблюдалась существенная неоднородность упрочнения по сечению прутка, в известной мере, аналогичная той, которая наблюдается при волочении. Однако с увеличением  $\delta$  до 60...80% упрочнение при низкотемпературном (77 К и ниже) выдавливании оказывалось практически одинаковым по всему объему, хотя при комнатной температуре выдавливания неоднородность упрочнения при этих степенях деформации продолжала наблюдаться. Этот результат важен был потому, что для экструдированного на достаточную степень деформации металла снимался вопрос о возможном влиянии на результаты исследований неоднородности упрочнения по сечению. В дальнейшем было высказано имеющее право на существование предположение, что при определенных уровнях давления, реализуемых в случае достаточно больших сте-

пней деформации, внешние слои заготовки в процессе экструдирования фактически играют роль квазигидростатической среды.

На понимание роли понижения температуры в формировании структуры, получаемой в металле при деформировании, оказали влияние приведенные ниже (рис. 4) результаты исследований, подтвержденных, кстати, и измерениями на экструдированных алюминии и свинце.

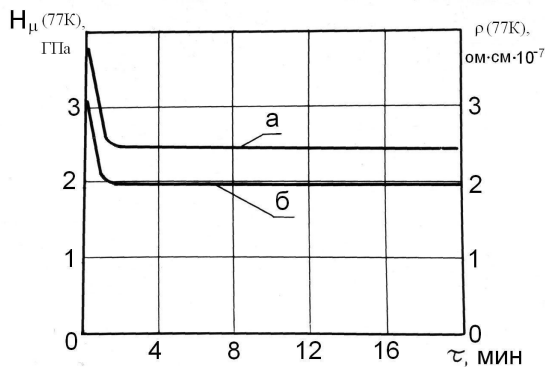


Рис. 4. Зависимость удельного электросопротивления (а) и микротвердости (б) меди, экструдированной при 77 К на 60%, от времени пребывания при 300 К

Лаборатория физики прочности ХФТИ была одним из пионеров в постановке экспериментов, где свойства деформированных при низких температурах материалов можно было бы исследовать без их отепления. Проводились измерения микротвердости металлов как функции времени пребывания при комнатной температуре после низкотемпературного (77 К) экструдирования. Результаты такого характера исследований для экструдированной меди и приведены на рис. 4 (кр. б). Можно было бы предположить, что они отражают процессы, происходящие в поверхностном слое экструдата, упрочняющемся при обычной экструзии (выдавливании) несколько больше остального объема. Однако аналогично поставленные эксперименты по измерению электросопротивления показали практически идентичное изменение электросопротивления (см. рис. 4, кр. а), что указывает на объемный характер процессов, влияющих на изменение микротвердости металла по мере пребывания его при комнатной температуре после низкотемпературного экструдирования. Скорее всего, 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. И именно в результате этого отогрева до комнатной температуры окончательно формируется и фиксируется (для разных материалов по-разному) та структура, которую мы и наблюдаем при последующих структурных исследованиях, те, отвечающие этой структуре характери-

ки материала, которые мы фиксируем при изучении механических и иных свойств. Этим, в частности, может объясняться и описанный выше результат [1], когда было обнаружено, что при одинаковом среднем размере ячейки может иметь место различная структура границ ячеек. Ведь речь идет о структурах, полученных прокаткой в области криогенных температур вплоть до 4,2 К.

Низкотемпературное выдавливание на примере меди показало себя методом упрочнения, позволяющим получать структуры и свойства, недостижимые при других видах пластической деформации. Неутешительным выводом, однако, оказалось то, что такому виду обработки можно подвергать только достаточно пластичные и умеренно прочные материалы. Уже на никеле удовлетворительных результатов достичь не удавалось. Неминуемым следствием стала необходимость решить задачу реализации аналога гидроэкструзии, но при криогенных температурах.

Необходимость осуществления формоизменения, пластической деформации при низких температурах в условиях гидростатического или близкого к гидростатическому давления в нашем случае потребовала специального подбора передающей давление среды. Изложенным выше требованиям к средам такого характера не удовлетворяет в полной мере ни один известный материал, тем не менее, были опробованы свинец и индий, графитовый порошок и парафин, лед, затвердевшее масло. Удовлетворительные результаты были получены с парафином и достаточно многообещающие с графитовым порошком. Но вне конкуренции оказался индий, причем важно то, что предел текучести индия с понижением температуры изменяется не слишком существенно, индий возможно применять во всем диапазоне температур от 300 К и вплоть до гелиевой.

В результате был предложен метод квазигидроэкструдирования металлов и сплавов при криогенных температурах, причем в качестве силового органа был использован вышеописанный низкотемпературный экструзионный пресс, а рабочий узел для низкотемпературной квазигидроэкструзии показан на рис. 5.

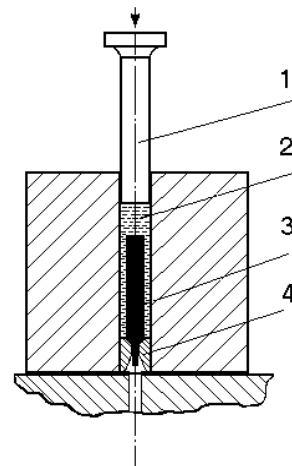


Рис. 5. Рабочий узел для квазигидроэкструдирования: 1 — пуансон; 2 — передающая давление среда; 3 — заготовка; 4 — матрица

В рабочем объеме контейнера находится экструдированная заготовка, диаметр которой меньше диаметра канала контейнера, все остальное пространство в канале контейнера заполнено рабочей средой (выше указано, как правило, индием или парафином). В процессе деформирования в канале контейнера действительно реализуются квазигидростатические условия, заготовка из контейнера выдавливается целиком, так что в пресс-остатке находится только промежуточная пластичная среда. Кроме указанного, еще ряд факторов свидетельствует о том, что в данном случае в контейнере реализуется давление, близкое к гидростатическому: постоянство диаметра заготовки, находящейся в контейнере, по мере истечения ее через фильеру, высокая однородность структуры и механических свойств по сечению выходящего прутка.

Так были в ХФТИ впервые реализованы преимущества объединения эффекта действия всестороннего сжатия, препятствующего возникновению растягивающих напряжений, и фактора глубокого охлаждения, обеспечивающего подавление процессов динамического возврата. Разработанный способ пластического деформирования металлов при низких температурах был назван авторами низкотемпературной квазигидроэкструзией [11].

Необычные условия, в которых вынужден деформироваться металл при низкотемпературной квазигидроэкструзии, определяют особенности формируемой при этом структуры и, естественно, свойств материала. В квазигидроэкструдированной при 77 и 20 К меди, например, наблюдается регулярная наноструктура, представляющая собой ансамбль, состоящий из примерно равноотстоящих друг от друга протяженных плоских дислокационных стенок из дислокаций одного знака, но чередующегося при переходе от одной стенки к другой (рис. 6) [12].

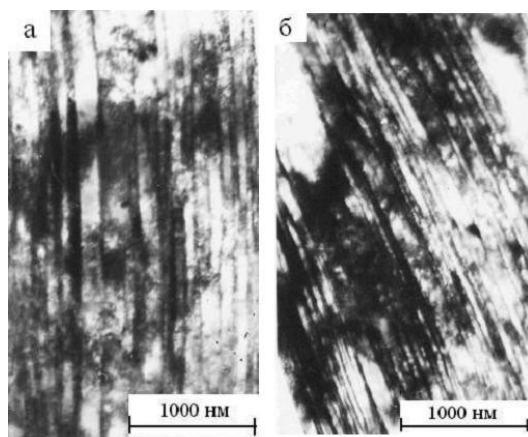


Рис. 6. Структура меди, квазигидроэкструдированной на 60% при 77 (а) и 20К (б)

В зависимости от температуры низкотемпературного квазигидроэкструдирования и от степени деформации при экструзии расстояние между стенками составляет 0,2...0,05 мкм. Такая регулярная «сверхструктура», имеющая нечто общее с регуляр-

ным расположением слоев атомов в монокристалле («усе»), определяет и похожее поведение материала в случае приложения к нему растягивающих нагрузок: разрушение объекта происходит при напряжениях, существенно более низких, чем те очень высокие нагрузки, которые материал способен выдерживать до начала пластической деформации [13].

Обращает на себя внимание, что в случае низкотемпературной квазигидроэкструзии в ряде случаев перестает наблюдаться привычное для исследователей снижение термоустойчивости механических характеристик металла по мере снижения температуры предварительной пластической деформации. В качестве примера можно привести результаты, полученные на монокристаллах никеля (рис. 7) [14, 15].

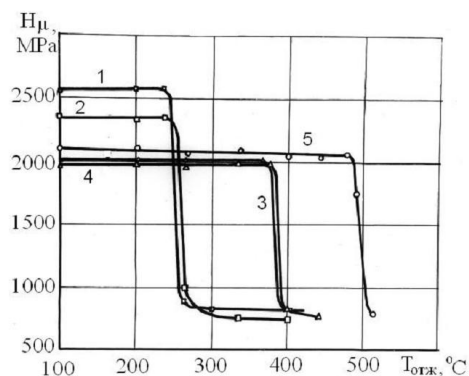


Рис. 7. Влияние получасовых нагревов на микротвердость экструдированного монокристаллического никеля. С направлением экструдирования совпадают оси: кр. 1, 2 – [110]; кр. 3, 4 – [100]; кр. 5 – [112].  $T_{экстр} = 77 \text{ К}$  – кр. 2, 4, 5;  $T_{экстр} = 20 \text{ К}$  – кр. 1, 3

Низкотемпературному квазигидроэкструдированию подвергались монокристаллы, у которых с направлением экструдирования совпадали одна из следующих осей: [100], [110], [112], причем первые две ориентации деформировались как при 77 К, так и при 20 К.

Оказалось, что в случае ориентации [110] (кр. 1 и 2) температура квазигидроэкструдирования на уровне упрочнения сказывается незначительно, а термическая устойчивость (температура начала рекристаллизации) от температуры экструдирования оказалась практически независимой (240 °С). В случае ориентации [100] (кр. 3 и 4) упрочнение при обеих температурах оказалось вообще одинаковым и более низким, зато резко возросла термоустойчивость, достигнув уровня около 370 °С для обеих температур экструдирования. Наиболее неожиданным оказался результат, полученный на ориентации [112]. Обнаружив несколько более высокий уровень упрочнения, чем для ориентации [100], монокристалл с ориентацией [112] проявил рекордно высокую термоустойчивость: при получасовых отжигах рекристаллизация обнаруживалась только при температуре 480 °С. Необходимо объяснить, почему для сравнения не фигурируют результаты по экструдированию этих объектов в условиях комнатной температуры.

Дело в том, что квазигидроэкструдирование при комнатной температуре практически не обеспечивает монокристалличности получаемого экструдата, в силу чего при нагревах эти объекты начинают рекристаллизоваться раньше, чем квазигидроэкструдированные при низких температурах.

Изложенное выше приводит к нетривиальному выводу: повышения термоустойчивости металла, упрочненного пластическим деформированием, можно достигать, понижая температуру этого деформирования, при условии, конечно, что это деформирование производится в условиях действия сил всестороннего сжатия (вид деформирования в нашем случае – квазигидроэкструзия).

ГЦК-металлы были объектами исследования на начальных этапах становления низкотемпературной квазигидроэкструзии как мощного способа воздействия на металлы пластическим их деформированием. Но дальнейшее развитие метода требовало создания новых устройств, которые позволили бы вести поиски возможностей повышения характеристик материалов конструкционных, находящих широкое применение.

Эта задача была решена разработкой нескольких специализированных устройств. С одной стороны, это подобный вышеописанному низкотемпературный пресс, с собственным гидросиловым устройством, позволяющий благодаря соответствующим техническим решениям обрабатывать достаточно большие заготовки без значительных затрат хладагента [16]. С другой – это приставки к стандартным промышленным прессам как позволяющие работать с хладагентами, требующими замкнутого контура для испаряющегося газа [17], так и с открытым сосудом Дьюара [18]. На рис. 8 приведена схема последней, используемой как низкотемпературная экструзионная приставка к прессу ПСУ-50.

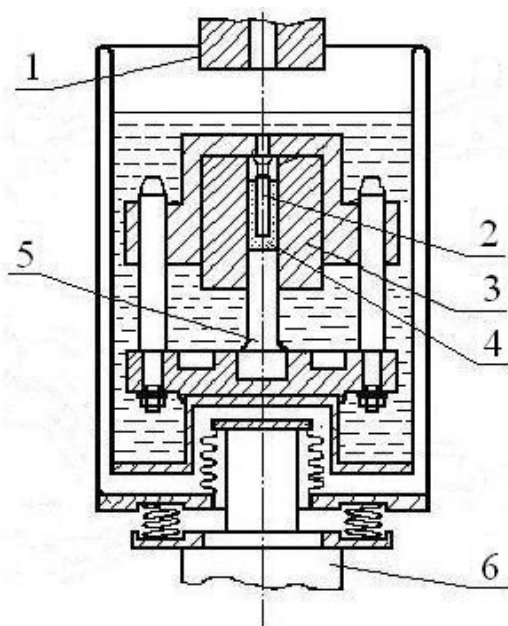


Рис. 8. Приставка для низкотемпературной квазигидроэкструзии к прессу ПСУ-50:  
1 – упор-приемник; 2 – заготовка; 3 – контейнер

высокого давления; 4 – передающая давление среда;  
5 – пуансон; 6 – стол пресса

Возможности применения низкотемпературной квазигидроэкструзии для улучшения свойств конструкционных материалов в большой мере были проверены на нержавеющей, аустенитных в исходном состоянии сталях, в первую очередь, – на Х18Н10Т. Известны такие свойства этой стали, как значительная пластичность при достаточных для широкого практического применения прочностных характеристиках: предел текучести 220...240 МПа, предел прочности 620...650 МПа (при комнатной температуре), переход аустенита стали при пластической деформации в мартенситное состояние (при комнатной температуре деформирования – до 20...25%, а после растяжения либо обжатия при 77 К – вплоть до 90%), причем при нагревах закрепление межфазных границ, стабилизация мартенсита приводят к приросту значений прочности стали с некоторой потерей пластичности.

Ожидаемое повышение прочностных характеристик из-за понижения температуры упрочняющего деформирования действительно имело, но, как и в случае чистых металлов, различия носили не просто количественный характер [19-21]. Как оказалось, экструдирование стали при 77 К уже на 30...35% приводило к практически полному переходу аустенита в мартенсит, причем высокой дисперсности. В случае используемого нами метода квазигидроэкструзии геометрия распределения действующих на заготовку сил такова, что в зоне очага деформации материал находится в условиях действия сил всестороннего сжатия. Это играет существенную роль, так как мартенситная фаза (как  $\alpha$ , так и  $\epsilon$ ) имеет решетку несколько менее плотную, чем аустенит ( $\gamma$ -фаза). Переход от аустенитной фазы в мартенситную в условиях всестороннего сжатия энергетически не выгоден. Но, если совокупность действующих факторов (определенный уровень пластической деформации и достаточно низкая температура деформирования) все же вынуждает осуществление мартенситного перехода, образующиеся зародыши мартенситной фазы лишены возможности роста из-за действия сил всестороннего сжатия. Зато образуется их много.

Именно высокой плотностью границ раздела в полученной практически однофазной структуре мартенсита приходится объяснять тот факт, что процессы закрепления границ, связанных с выпадением вторичных фаз (карбидов и карбонитридов) происходят в исследуемом случае при температурах, на 100...130° превышающих имеющиеся в случае отжигов этой же стали, деформированной при той же (77 К) температуре, но при другой геометрии деформации, в отсутствие действия в очаге деформации сил всестороннего сжатия. Хотя описываемые методики обеспечивают стали способность упруго деформироваться вплоть до 2000 МПа при сохранении определенного запаса пластичности, но не это вызывает основной интерес. Более важным представляется то, что сталь сохраняет высокие механические характеристики и при достаточно высокой ( $T_{\text{нел}} 500$

°С) температуре (рис. 9), причем сохраняет их и после многочасовых выдержек при этой температуре.

Приведенные результаты позволяют опять, как и в случае с экструдированием монокристаллов никеля, прийти к заключению, что для повышения термостойкости материала температуру его предварительного пластического деформирования следует понижать вплоть до криогенной, но, естественно, проводить такое деформирование в условиях действия на обрабатываемый объект сил всестороннего сжатия.

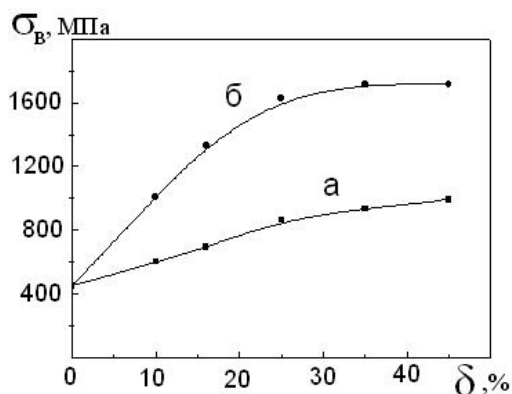


Рис. 9. Прочность стали, квазигидроэкструдированной при 300 (а) и 77 К (б) и затем отожженной при 750 К ( $T_{\text{отж}}=770$  К)

Однофазность получаемого вышеописанными способами стали является качеством положительным, проявляемым, например, в более высокой коррозионной стойкости при нагревах, чем сталь двухфазная (аустенит с некоторой долей мартенсита). Это и понятно, так как наиболее коррозионно-нестойкими являются межфазные границы. На практике большой интерес проявляется к аустенитным, немагнитным сталям, но с высокими механическими характеристиками. Причем важным параметром является способность стали упруго деформироваться до высоких напряжений. Именно с такими свойствами удастся получить сталь X18H10T, заставив путем специальных термообработок созданную описанными методиками структуру высокодисперсного мартенсита превратиться в ультрамелкодисперсный аустенит. В результате аустенитная сталь X18H10T оказывается способной упруго деформироваться при комнатной температуре вплоть до напряжений 1000...1050 МПа, а пластичность ее (42...45%) даже превышает пластичность исходной гомогенизированной стали.

Нержавеющие стали типа X18H10T в исходном состоянии имеют ГЦК-решетку, поведение их при экструдировании имеет много общего с поведением других ГЦК-металлов – меди, алюминия, никеля. Но квазигидроэкструдированию при низких (как правило, 77...20 К) температурах подвергался широкий круг металлов и сплавов и с другими типами решеток. Недостижимые при других видах воздействия плотности дефектов и уровни механических характеристик приобретали ниобий [22] и ванадий [23], стали У7 и ст50, ниобий-титановые сплавы.

Работе с последними было уделено немало внимания. Так как ХФТИ являлся соисполнителем большой программы по сверхпроводящему сплаву НТ-50, в частности отдел физики низких температур, то Б.Г. Лазарев проявлял большой интерес к тому, насколько эффективным может быть для улучшения параметров этого сверхпроводника воздействие на него низкотемпературной квазигидроэкструзии. Специально для осуществления низкотемпературного квазигидроэкструдирования проволочек была разработана конструкция заготовки [24], проработана технология такой обработки [25]. Как и ожидалось, механические характеристики сплава существенно увеличились, был обнаружен существенный рост плотности критического тока, достигавшего в поле 5 Тл около  $3,4 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>. Естественно, эти эксперименты носили чисто исследовательский характер, так как реализация такой обработки для делового провода не представляется возможной, но ожидался ответ на вопрос, какой уровень дефектности структуры может быть достигнут в сверхпроводнике при таком воздействии. В определенной мере этот ответ дали как электронная, так и автоионная микроскопия, обнаружившие микронеоднородности пластической деформации, обеспечивающие неравномерность распределения дислокаций с образованием скоплений, имеющих локальную плотность до  $7 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Приведенные выше результаты представляют собой очень краткий и далеко не полный обзор исследований, связанных с разработкой и применением способов деформирования металлов в условиях действия сил всестороннего сжатия при криогенных температурах, которые до последнего времени проводятся только в НИЦ ХФТИ. Ряд начатых исследований требует своего продолжения, позволяющего на основе разработанных методик и устройств надеяться на достижение дальнейшего улучшения характеристик исследуемых материалов. Однако сегодня мы располагаем еще одним инструментом воздействия на металлы при низких температурах.

Недостаток описанного выше метода («традиционной» низкотемпературной квазигидроэкструзии) состоит в том, что уровень сил всестороннего сжатия, воздействующего на деформируемый объект, однозначно связан со степенью деформации (обжатия), которую должна испытать заготовка. Однако если к экструдату, выходящему из матрицы, приложить встречное усилие, т.е. создать противодействие, то процесс экструдирования будет определяться разностью между уровнем давления в контейнере и величиной противодействия. Естественно, для осуществления процесса экструдирования потребуется создать большее давление в контейнере, из которого выдавливается объект, на величину, равную уровню противодействия, однако, задавая эту величину, можно будет управлять уровнем сил всестороннего сжатия, воздействующего на экструдированный материал, не будучи привязанными к степени деформации, на которую этот объект предполагается продеформировать. Эксперименты по низкотемпературному квазигидроэкструдированию с проти-

водавливанием сейчас уже начаты [26]. Полученные результаты говорят о способности не только дополнительного повышения и без того высоких характеристик, обеспечиваемых «традиционной» низкотемпературной квазигидроэкструзией, но и о возможности осуществлять низкотемпературное квазигидроэкструдирование таких материалов, которые без приложения противодавления пластически проэкструдировать при низких температурах не удастся (рис. 10).

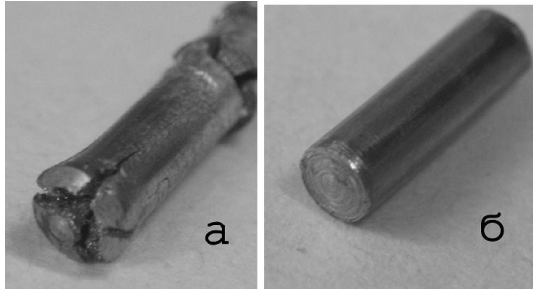


Рис. 10. Образцы углеродистой стали, подвергнутой упрочняющей обработке квазигидроэкструдированием при 77 К: а – без применения противодавления (упрочнение 10...15%); б – с применением противодавления (упрочнение 50...70% при отсутствии нарушений сплошности)

Изложенное выше позволяет утверждать, что существуют реальные перспективы дальнейшего существенного повышения дисперсности структуры монолитных металлов и сплавов методами пластической деформации как предпосылки улучшения их свойств, в качестве важных условий для этого рассматривать необходимость проведения такого деформирования в условиях всестороннего сжатия и при криогенных температурах.

Продолжением описанных выше исследований предполагается разработка способов получения заданных характеристик в монолитных металлических материалах (сталях, сплавах на основе титана и др.) на объектах, представляющих практический интерес.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И.А. Гиндин, М.Б. Лазарева, В.П. Лебедев, Я.Д. Стародубов, В.М. Мацевитый, В.И. Хоткевич // *Физика металлов и металловедение*. 1967, т. 24, в. 2, с. 347–353.  
 2. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, В.К. Аксенов // *Металлофизика*. 1980, т. 2, в. 2, с. 49–67.  
 3. V. Lengyel and L.E. Calver. Properties of Materials Extruded by Orthodox Hydrostatic Extrusion // *Journal of*

*the Institute of Metals*. 1969, v. 97, p.97–103 (2509–2515).

4. П. Бриджмен. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: ИЛ, 1955, 444 с.  
 5. Л.Ф. Верещагин. *Избранные труды. Твердое тело при высоких давлениях*. М.: «Наука», 1981, 386 с.  
 6. H.L. D.Pugh, J. Less, K. Ashiroft and D.A. Gann. High Pressure Research at the National Engineering Laboratory // *The Engineer*. 1961, v. 212, #5508, 18 aug, p. 258–262.  
 7. Б.Г. Лазарев, Л.С. Канн // *ЖЭТФ*. 1944, т.14, в. 10-11, с. 433–440.  
 8. Дж. Стюарт. Высокие давления при низких температурах // *В кн.: Современная техника сверхвысоких давлений*. М.: «Мир», 1964, с. 284–313.  
 9. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович // *Проблемы прочности*. 1973, №7, с. 122–123.  
 10. И.А. Гиндин, С.Ф. Кравченко, Я.Д. Стародубов. Экструзия металлов при 77...4,2К // *Приборы и техника эксперимента*. 1970, в. 6, с. 206–207.  
 11. Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович // *Проблемы прочности*. 1975, в. 10, с. 116–117.  
 12. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, М.П. Старолат, П.А. Хаймович // *Физика металлов и металловедение*. 1975, т. 40, в. 2, с. 403–408.  
 13. П.А. Хаймович // *Вестник Харьковского национального университета* (в печати).  
 14. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович // *Металлофизика*. 1988, т. 10, в. 3, с. 97–100, 119.  
 15. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович // *В сб.: Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов*. Тула: Тульский политехнический институт, 1980, с. 72–75.  
 16. А.с. 846304 (СССР) / В.У. Асанов, И.А. Гиндин, С.Ф. Кравченко, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович, С.Я. Чеканов, В.П. Яшин.  
 17. А.с. 1080292 (СССР) / В.У. Асанов, А.В. Мац, П.А. Хаймович. 1983 г.  
 18. А.с. 1026883 (СССР) / В.У. Асанов, П.А. Хаймович. 1983 г.  
 19. В.В. Брык, И.М. Неклюдов, В.И. Соколенко, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2005, т. 27, в. 4, с. 551–562.  
 20. А.С. Кальченко, А.В. Мац, И.М. Неклюдов, В.И. Соколенко, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2005, т. 27, в. 5, с. 585–593.  
 21. П.А. Хаймович // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. 2005, т. 3, № 3, с. 855–861.  
 22. В.К. Аксенов, А.В. Мац // *Физика и техника высоких давлений*. 1989, в. 31, с. 31–36.  
 23. В.А. Мац, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович // *ВАНТ. Сер. «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2002, №1, с. 161–164.  
 24. А.с. 1367256 (СССР) / П.А. Хаймович. 1986.  
 25. А.с. 166818 (СССР) / И.А. Гиндин, Б.Г. Лазарев, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович, М.Б. Лазарева, А.В. Мац, В.И. Соколенко. 1980.  
 26. Патент Украины №75155 / П.А. Хаймович. 2006.

#### КРИДЕФОРМАЦІЯ МЕТАЛІВ ПРИ ВСЕБІЧНОМУ СТИСНЕННІ

П.О. Хаймович

Приведена інформація про розвиток методів пластичного деформування металів і сплавів в умовах всебічного стиснення при криогенних температурах як продовження досліджень, що проводяться в ХФТІ протягом багатьох років, в області міцності і пластичності металів, що зазнали деформацію при низьких температурах. Описані методи і пристрої, що дозволяють криодеформуванням в умовах всебічного стиснення одержувати структурні стани, які забезпечують металу високі механічні характеристики в широкій області температур. Запропоновані перспективи розвитку цих методів.

## **DEFORMATION OF METALS AT CRYOGENIC TEMPERATURE IN THE CONDITIONS OF UNIFORM COMPRESSION**

*P.A. Khaimovich*

The information on development of methods of a plastic deforming of metals and alloys in the conditions of uniform compression at cryogenic temperatures as continuation spent in KIPT for many years researches in the area of strength and plasticity of the metals which have undergone deformation at low temperatures is given. Methods and the devices are described allowing by deformation at cryogenic temperature in the conditions of uniform compression to gain structural states, that provide to metal high mechanical properties in wide area of temperatures. Prospects of development of these methods are offered.