

PACS: 62.20.Fe, 81.40.-z

П.А. Хаймович

ОТ ГИДРОЭКСТРУЗИИ К БАРОКРИОДЕФОРМИРОВАНИЮ

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2012 года

Рассмотрены особенности условий деформирования металлов при гидроэкструзии (ГЭ) и барокриодеформировании (БКД), роль этих условий в формировании структуры и характере свойств, приобретаемых в результате такого деформирования. Показано, что для достижения высоких эксплуатационных характеристик при деформировании металлов важным является выполнение одновременно обоих условий – наличия сил всестороннего сжатия и проведения деформирования при криогенных температурах.

Ключевые слова: гидроэкструзия, всестороннее сжатие, барокриодеформирование, криогенные температуры, металлы, прочность, пластичность

Розглянуто особливості умов деформування металів при гідроекструзії (ГЕ) і барокріодеформуванні (БКД), роль цих умов у формуванні структури і характері властивостей, придбаних в результаті такого деформування. Показано, що для досягнення високих характеристик металів при їх деформуванні важливим є наявність обох умов – сил всебічного стиснення і проведення деформування за криогенних температурах.

Ключові слова: гідроекструзія, всебічне стиснення, барокріодеформування, криогенні температури, метали, міцність, пластичність

Обычно ГЭ рассматривается как один из распространенных видов деформирования материалов, в первую очередь металлов и сплавов, с целью изменения их свойств или формы. Так, например, в Большом Российском энциклопедическом словаре гидроэкструзия определяется как «обработка металлов давлением, при которой заготовка, помещенная в замкнутый контейнер, выдавливается через канал матрицы воздействием на нее жидкости высокого давления». В действительности не совсем правильно считать ГЭ просто одним из вариантов деформирования. Продавливание материала через матрицу, происходящее при ГЭ, может осуществляться и без наличия промежуточной передающей давление среды, что подтверждается многовековой историей. Главная особенность ГЭ состоит в том, что она характеризуется особыми условиями деформирования – а именно до начала деформирования

заготовка подвергается всестороннему сжатию. По схеме, приведенной на рис. 1,а, уровень гидростатического давления, достигаемого до начала пропрессовывания заготовки, однозначно определяется пределом текучести ее материала. Пока он не будет достигнут в зоне контакта с матрицей, заготовка продавливаться через матрицу не начнет. Такая схема успешно используется в практике, в производстве. Родоначальником ее был П. Бриджмен [1], в СССР эти работы были продолжены В.Ф. Верещагиным с сотрудниками, а затем ведущей организацией в области гидроэкструзии стал ДонФТИ, где поиски новых форм применения гидроэкструзии продолжают по сей день [2–4]. Особые условия деформирования, имеющие место при ГЭ, приводят к формированию таких структур, которые иным образом не реализуемы [5]. При ГЭ достаточно пластичных материалов не только исключается появление микронесплошностей в результате деформирования, но, более того, имеет место залечивание имеющихся в металле микротрещин, пор и т.п. [6].

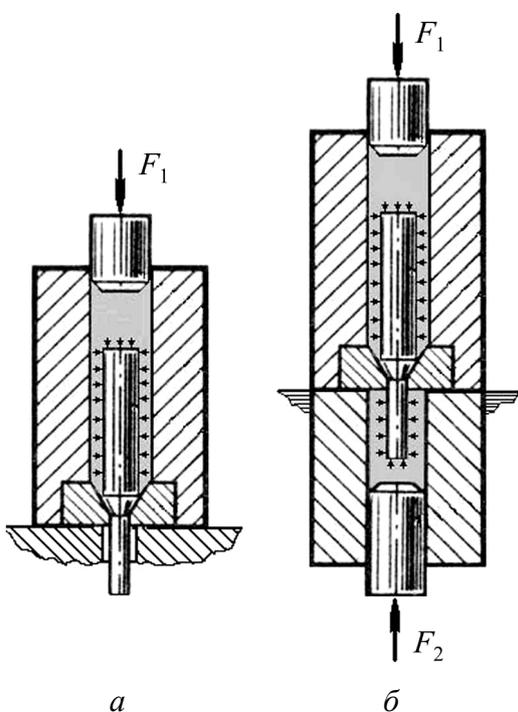


Рис. 1. Схемы гидроэкструзии: а – общий случай гидроэкструзии, б – частный случай гидроэкструзии

Гидроэкструзия обеспечивает высокую однородность приобретаемых металлом высоких физико-механических характеристик по объему экструдата и устойчивость получаемых свойств, но, как и другие самые современные технологии, имеет определенные границы применимости. Одно из серьезных ограничений – невозможность реализации ГЭ при пониженных или криогенных температурах, т.е. тогда, когда применяемые в качестве среды, передающей давление, жидкости, затвердевая, перестают выполнять эту функцию. В то же время начавшиеся еще в первой трети прошлого века работы по исследованию свойств металлов, претерпевших деформирование при криогенных температурах, показали высокую эффективность пониже-

ния температуры деформирования. В металле при этом формируются структуры высокой дисперсности, что приводит, в частности, к таким уровням упрочнения металла, которые в случае деформирования при комнатной или повышенных температурах не достижимы [7–9]. При криогенных температурах осуществляют прокатку, ковку, волочение и др. В последнее время деформирование в условиях низких температур иногда стали называть общим термином *криодеформирование* [10]. По аналогии естественно было бы деформирование в условиях действия сил всестороннего (гидростатического) сжатия (что, в частности, имеет место при ГЭ) называть *бародеформированием* (рис. 2).

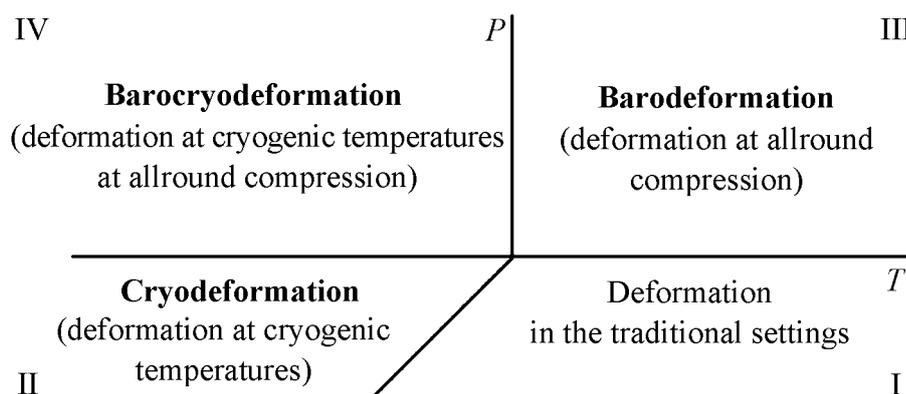


Рис. 2. Различные условия деформирования материалов

Естественное желание объединить преимущества деформирования в условиях всестороннего сжатия с тем выигрышем в упрочнении, который дает понижение температуры деформирования в область криогенной, привело к разработке методов и устройств, позволяющих реализовать *барокриодеформирование*. Сюда можно отнести и кручение под давлением при криогенных температурах [11], и сжатие в обойме [12]. Но наиболее полно, конечно же, преимущества деформирования при низких температурах в условиях всестороннего сжатия реализуются при низкотемпературной квазигидроэкструзии [13]. Именно она сегодня нередко именуется барокриодеформированием. Фактически это аналог гидроэкструзии, но в качестве передающей давление среды применяется не жидкость, а твердое тело, пластичность которого при низких температурах много выше пластичности экструдруемого металла или сплава [14]. В канале цилиндра высокого давления, содержащем предназначенную для выдавливания заготовку, при этом создаются, естественно, не чисто гидростатические, а квазигидростатические условия, потому первоначально этот метод и был назван низкотемпературной квазигидроэкструзией. Реализация этого вида деформирования потребовала разработки и создания специализированных устройств, а затем, для упрощения, – низкотемпературных приставок к промышленным прессам [15–17].

В сравнении с низкотемпературными прокаткой, волочением и другими обработками, где к деформируемому объекту не прикладываются силы все-

стороннего сжатия, преимущества БКД обнаруживаются как в том, что в приобретающем высокие уровни упрочнения металле отсутствует склонность к хрупкому разрушению, так и в повышенной термоустойчивости созданных структур, достигнутых свойств, что определяется совокупностью условий деформирования и параметров последеформационного отогрева [18]. При этом могут наблюдаться такие изменения свойств и структуры материала, которые в других условиях деформирования нереализуемы, что иллюстрирует, например, электронная микроскопия поликристаллической меди, подвергнутой прокатке (рис. 3) [19] и квазигидроэкструзии (рис. 4) [20]. В случае квазигидроэкструзии, в отличие от прокатки, с понижением температуры деформирования в меди обнаруживается формирование упорядоченной, регулярной структуры, тем более дисперсной, чем ниже температура экструдирования (рис. 4, в–д).

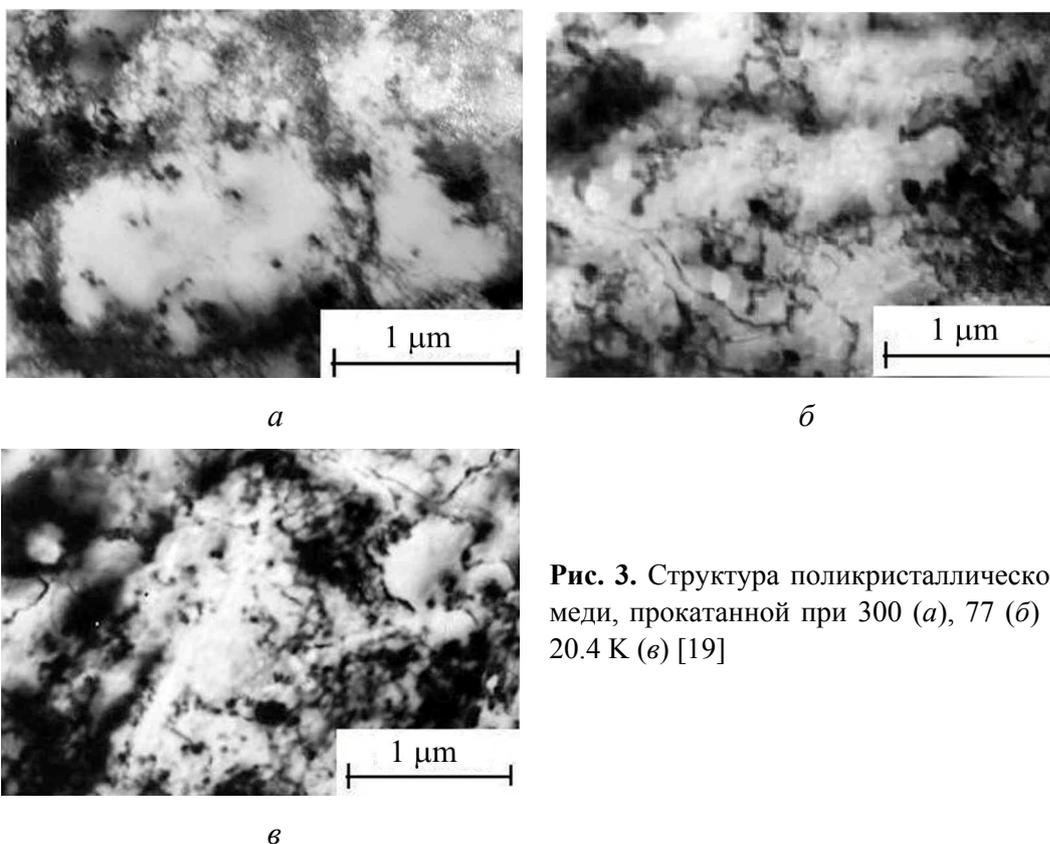


Рис. 3. Структура поликристаллической меди, прокатанной при 300 (а), 77 (б) и 20.4 К (в) [19]

Высокоугловые развороты при наличии всестороннего сжатия затруднены. В противном случае потребовалась бы дополнительная работа против внешних сил, обеспечивающих всестороннее сжатие экструдированного тела. Пластическая деформация кристаллитов металла в этих условиях идет с незначительной разориентацией близко расположенных слоев с чередующимся при этом знаком разориентации, что подтверждается микродифракционными исследованиями. Наблюдаемая дефектная структура представляет собой дислокационные стенки чередующегося знака, равноотстоящие друг от

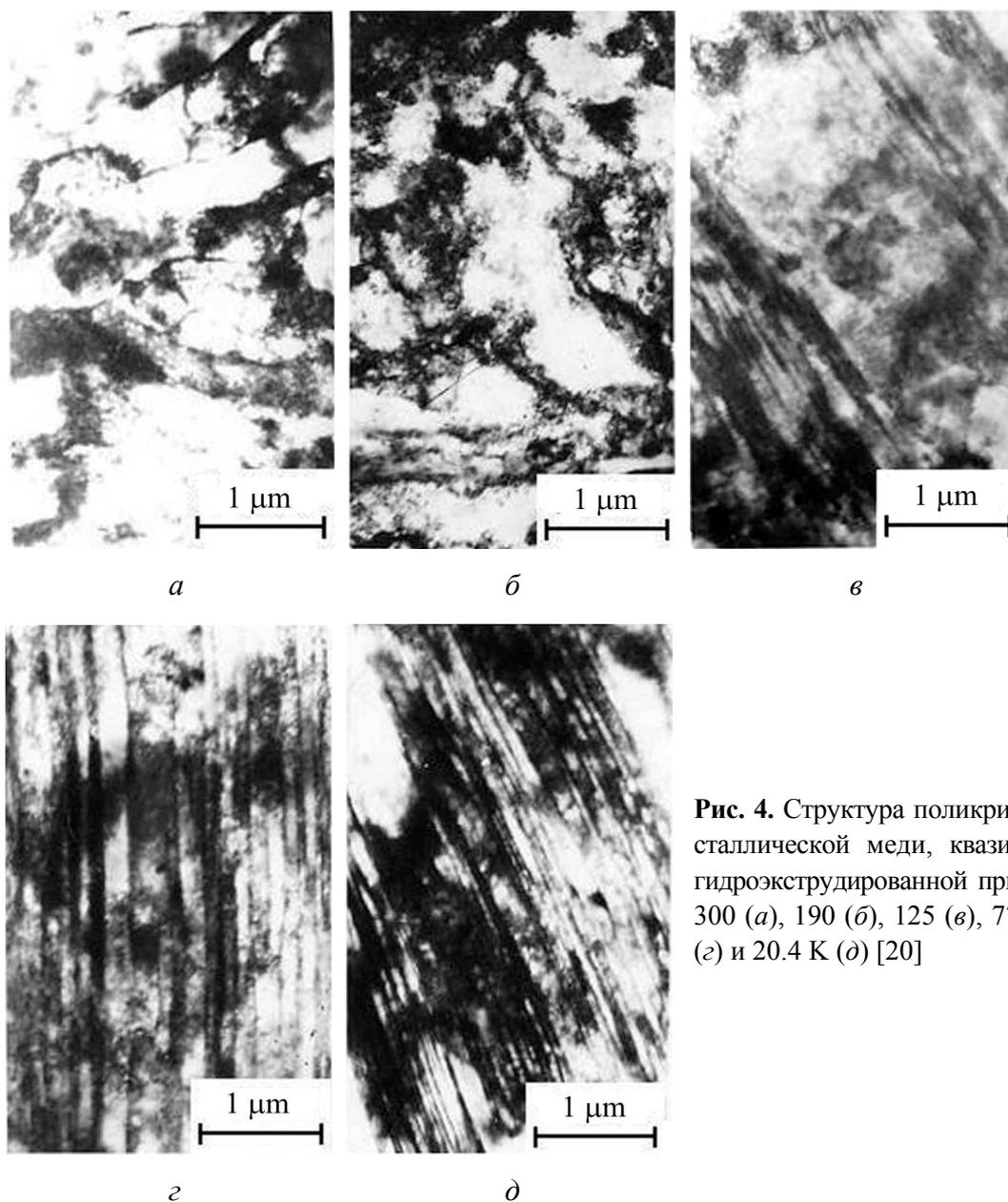


Рис. 4. Структура поликристаллической меди, квази-гидроэкструдированной при 300 (а), 190 (б), 125 (в), 77 (г) и 20.4 К (д) [20]

друга, характеризующиеся регулярным, периодическим расположением [20]. Фактор понижения температуры экструдирования важен потому, что при этом подавляются процессы динамического возврата, что предопределяет накопление в материале максимально возможной концентрации дефектов, приводящее при дальнейшем отеплении до комнатной температуры к образованию слоистой, регулярной, стабильной структуры.

Термическая устойчивость механических характеристик квази-гидроэкструдированной при низких температурах меди несколько выше, чем после низкотемпературной прокатки. Обращает на себя внимание необычный характер пластической деформации при испытаниях на растяжение образцов, полученных из меди, экструдированной при 77 и 20.4 К. Они упруго дефор-

мируются до напряжений в 700–720 МПа, после чего напряжение лавинообразно сбрасывается до 450–480 МПа, и дальнейшая пластическая деформация происходит в образовавшейся шейке, причем разрыв происходит при напряжениях до 500 МПа. Парадоксальная ситуация, заключающаяся в том, что предел текучести металла значительно превосходит предел прочности, имеет свое объяснение.

Способностью упруго деформироваться вплоть до упомянутых выше 700–720 МПа обладает сформировавшаяся при низкотемпературной квазигидроэкструзии описанная выше регулярная структура (рис. 4, *з, д*). Но при достижении предела текучести, как показали электронно-микроскопические исследования, в наиболее слабом месте образца происходит лавинообразная перестройка регулярной структуры в ячеистую, не способную выдерживать столь большие напряжения, как регулярная. В этой ячеистой структуре и протекает вся дальнейшая деформация вплоть до разрушения (рис. 5) [21].

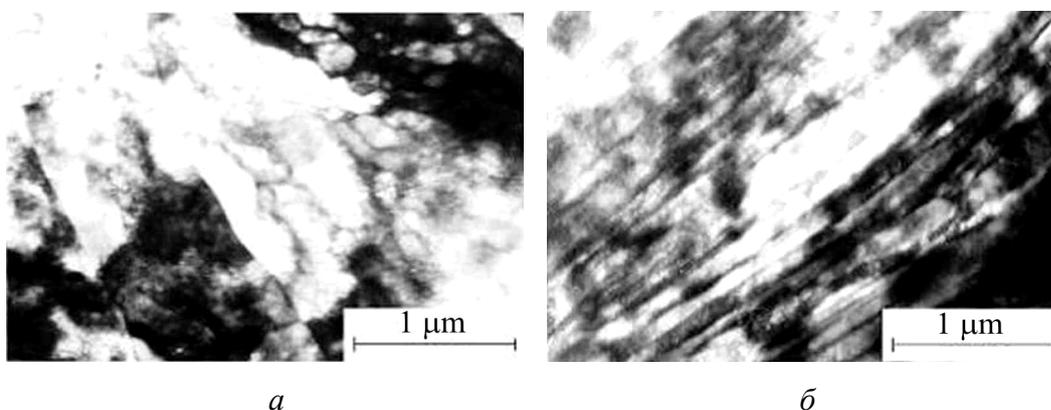


Рис. 5. Структура поликристаллической меди, квазигидроэкструдированной при 77 К на 60% и подвергнутой растяжению при 300 К до образования шейки: *а* – в зоне шейки, *б* – вдали от шейки [21]

На возможность существования таких регулярных структур уже обращалось внимание [22]; высказывалось также предположение, что особенности дислокационного строения и взаимного расположения субграниц могут служить структурной причиной термической и механической устойчивости таких объектов.

Пластическое деформирование при криогенных температурах в условиях всестороннего сжатия оказалось эффективным методом повышения физико-механических характеристик не только таких пластичных металлов, как медь, но и широкого круга конструкционных материалов, в том числе с ограниченным запасом пластичности. Большой цикл работ, выполненных на стали X18H10T, показал ее способность упруго деформироваться вплоть до напряжений 1.8–2.0 ГПа без склонности к хрупкому разрушению после БКД (путем низкотемпературной квазигидроэкструзии) и специальных термообработок [23]. При этом наблюдался практически полный переход исходного аустенита в высокодисперсный мартенсит. Этот экспериментальный факт

потребовал специального исследования, поскольку известно, что наличие сил всестороннего сжатия тормозит γ - α -переход, протекающий с некоторым увеличением объема. Как оказалось, переход в основном имеет место тогда, когда заготовка уже прошла фильеру, т.е. вышла из камеры высокого давления, но еще пребывает при криогенной температуре [24].

Не менее важным оказалось и то, что имеет место и высокая термоустойчивость свойств деформированной таким образом стали, упруго деформирующейся при 500°C до напряжений 1.5–1.6 GPa [25].

Высокая дисперсность дефектной структуры, формирующейся при БКД, оказалась важной предпосылкой и для повышения характеристик стали X18H10T в аустенитном состоянии. Так, в процессе проведения обратного α - γ -перехода в специальных условиях удалось в 4–5 раз (с 0.2–0.22 до 1.0–1.1 GPa) поднять предел текучести стали в аустенитном состоянии при сохранении высокой пластичности [26].

Примером применения низкотемпературного деформирования для повышения свойств материала в области высоких температур может служить осуществление БКД при 77 К сплава PE-16 (Нимоник), предназначенного для изделий, работающих при высоких (до 750°C) температурах. БКД позволило значительно повысить прочностные характеристики (особенно предел текучести), измеренные при комнатной температуре, и сохранить более чем полуторакратный рост предела текучести в области предельных температур эксплуатации этого сплава [27].

Эффективность описанной схемы БКД как способа повышения физико-механических характеристик обнаружилась на многих металлах и сплавах, однако применение этой схемы для обработки низкопластичных материалов встретило трудности. Экструдированные заготовки теряют сплошность, растрескиваются при выходе из матрицы. Выход подсказали приемы классической гидроэкструзии, имеющей в своем арсенале такую форму воздействия, как гидроэкструзия с противодавлением [28].

Зависимости предельной пластичности от давления для низкопластичных материалов характеризуются так называемым порогом пластичности, т.е. таким уровнем прилагаемых к деформируемому телу сил всестороннего сжатия, при превышении которого материал обнаруживает пластичность, тем большую, чем выше приложенное давление (рис. 6) [29]. Такие условия можно реализовать, применив схему, представленную на рис. 1,б. Продавливание заготовки через матрицу осуществляется за счет разницы давлений в рабочем цилиндре и присоединяемой к нему камере противодействия. Чем более высокий уровень давления мы изначально обеспечим в этой камере, тем при более высоком давлении в рабочем цилиндре начнется продавливание заготовки через матрицу. Иными словами, появляется возможность переместиться по шкале давлений вправо, преодолеть пороговое значение давления (см. рис. 6), выше которого материал начинает обнаруживать пластичность. Применение этого подхода в случае БКД, т.е. при криогенных температурах, где в качестве рабочей среды используется твердое тело,

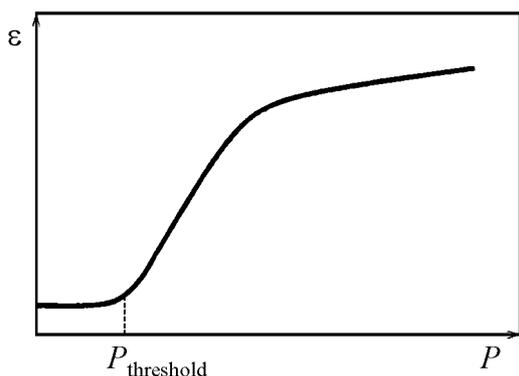


Рис. 6. Зависимость предельной пластичности ϵ при разрыве в условиях всестороннего давления P

потребовало новых технических решений, но оказалось вполне реализуемым [30]. Такую схему осуществления БКД, позволившую задавать в достаточно широких пределах стартовое давление, при котором начинался процесс экструдирования, можно рассматривать как *общий случай БКД* (в отличие от деформирования по схеме, показанной на рис. 1,а, где стартовое давление начала экструдирования однозначно определяется пределом текучести материала деформируемой заготовки). Схему, изображенную на рис. 1,а, называют *частным случаем БКД*. Эффективность применения общего случая БКД для низкопластичных металлов иллюстрируют рис. 7 и 8 [31].

Одним из преимуществ применения общего случая БКД является то, что он может благотворно влиять и на материалы с достаточным запасом пластичности, но относительно низким уровнем прочности. Сталь X18H10T, подвергнутая БКД с противодавлением всего на 10–15% ($e \sim 0.15$), обнаружила такой уровень упрочнения, который не достигался при БКД в отсутствие

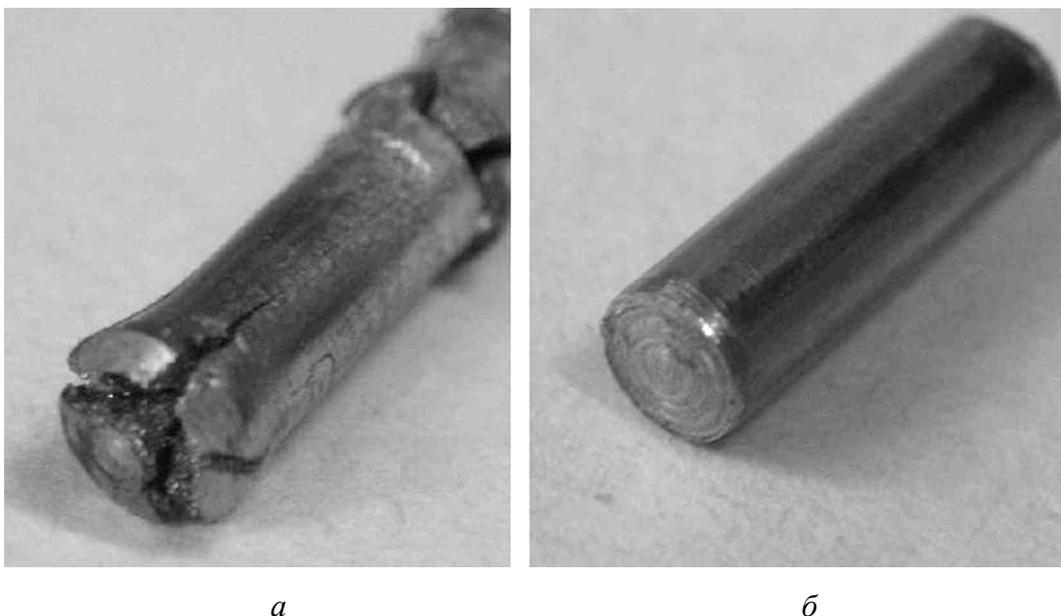


Рис. 7. Барокриодеформирование пальцевой стали ст50 при 77 К: а – частный случай, упрочнение 10–15%; б – общий случай (противодавление ~ 3 kbar), упрочнение 50–70% при отсутствии нарушений сплошности

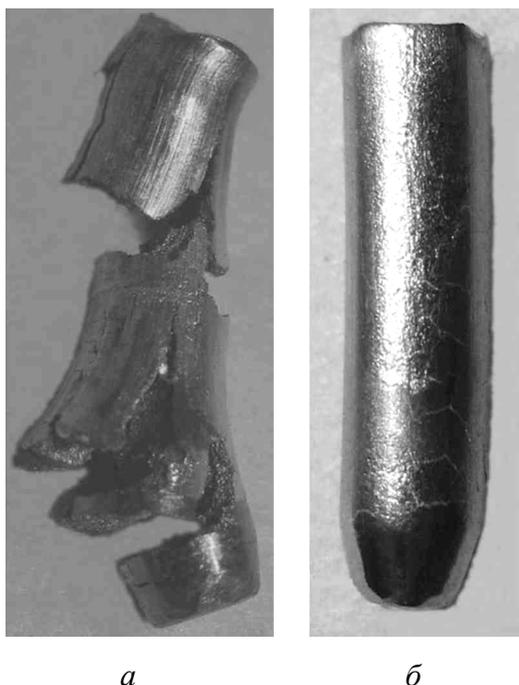


Рис. 8. Барокриодеформирование гафния при 77 К: *а* – частный случай, *б* – общий случай (противодавление ~ 6 kbar)

противодавления во всем доступном диапазоне степеней деформации. Имея в исходном состоянии предел текучести менее 250 МПа, в результате деформирования с применением общего случая БКД сталь оказалась способной непосредственно после БКД упруго деформироваться вплоть до напряжений 1.6–1.7 GPa, а после специальной термообработки предел текучести этой стали достиг 2.4–2.5 GPa, (причем без склонности к хрупкому разрушению), поперечное сужение в шейке при разрыве достигало 80–90% (температура испытания – комнатная) [30]. Электронно-микроскопические исследования показали, что и в этом случае, несмотря на столь небольшую деформацию при БКД, в стали имел место практически полный γ - α -переход, а размер фрагментов структуры составлял 0.09–0.15 μm при их разориентации 6–8° и выше [32].

Заключение

Осуществление деформирования металлов и сплавов в условиях всестороннего сжатия (примером чего в первую очередь являются гидроэкструзия и различные ее модернизированные виды) позволило добиться повышения их физико-механических характеристик и расширить круг материалов, чьи свойства, даже при низкой пластичности этих объектов, возможно существенно повышать пластическим деформированием. Но, как следует из изложенного выше, важнейшим фактором, способным повлиять на структуру и приобретаемые свойства, формирующиеся при гидроэкструдировании, является реализация деформирования при криогенных температурах, т.е. всестороннее сжатие и криогенная температура деформирования должны наличествовать одновременно. Помимо дополнительного прироста прочностных

характеристик важным результатом оказывается возможность понижением температуры деформирования металлов повышать их термоустойчивость. На некоторых металлах БКД приводит к формированию регулярных дефектных структур, определяющих специфические упругопластические характеристики. Обнаружилась и возможность получать в стали при общем случае БКД (БКД с противодавлением) при весьма малых деформациях ($e \sim 0.15$) ультрамелкодисперсную структуру, обеспечивающую соответственно высокие механические характеристики. Изложенное выше позволяет считать разумным расширение и углубление исследований в этом направлении.

1. П. Бриджмен, Исследования больших пластических деформаций и разрыва, Изд-во иностр. лит., Москва (1955).
2. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, Винтовая экструзия – процесс накопления деформации, ТЕАН, Донецк (2003).
3. Н.И. Матросов, В.В. Чишко, Н.Г. Кисель, Е.А. Павловская, Л.Ф. Сенникова, Э.А. Медведская, Тезисы 10-й Международной конференции «Высокие давления – 2008. Фундаментальные и прикладные аспекты», 16–20 сентября 2008 г., Судак, с. 104.
4. В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк, Теория и практика гидроэкструзии, Наукова думка, Киев (2007).
5. Е.Д. Мартынов, В.И. Трефилов, С.А. Фирстов, ДАН СССР **176**, 1276 (1967).
6. Д.К. Булычев, Б.И. Береснев, М.Г. Гайдуков, Е.Д. Мартынов, К.П. Родионов, Ю.Н. Рябинин, ФММ **18**, 437 (1964).
7. И.А. Гиндин, М.Б. Лазарева, В.П. Лебедев, Я.Д. Стародубов, В.М. Мацевитый, В.И. Хоткевич, ФММ **24**, 347 (1967).
8. Р.И. Гарбер, И.А. Гиндин, УФН **70**, 57 (1960).
9. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, В.К. Аксенов, Металлофизика **2**, № 2, 49 (1980).
10. И.С. Брауде, Н.Н. Гальцов, В.А. Москаленко, А.Р. Смирнов, ФНТ **37**, 1307 (2011).
11. Т.М. Гапонцева, В.П. Пилюгин, М.В. Дегтярев, Л.М. Воронова, Т.И. Чащухина, А.М. Пацелов, Материалы XX Петербургских Чтений по проблемам прочности, 10–12 апреля 2012 г., СПб, с. 257–259.
12. Н.А. Кругликов, Б.И. Каменецкий, А.М. Власова, А.Ю. Волков, Материалы XIX Петербургских Чтений по проблемам прочности, СПб (2009), с. 226–228.
13. Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович, Проблемы прочности № 10, 116 (1975).
14. П.А. Хаймович, в кн.: Перспективные материалы, ТГУ, МИСиС (2009), т. 3, с. 363–406.
15. В.У. Асанов, И.А. Гиндин, С.Ф. Кравченко, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович, С.Я. Чеканов, В.П. Яшин, А.с. СССР № 846304 (1978).
16. В.У. Асанов, П.А. Хаймович, А.с. СССР № 1026883 (1981).
17. В.У. Асанов, А.В. Мац, П.А. Хаймович, А.с. СССР № 1080292 (1982).
18. А.В. Мац, П.А. Хаймович, ФТВД **19**, № 1, 69 (2009).
19. И.А. Гиндин, М.Б. Лазарева, В.П. Лебедев, Я.Д. Стародубов, ФММ **23**, 138 (1967).

20. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, М.П. Старолат, П.А. Хаймович, ФММ **40**, 403 (1975).
21. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, М.П. Старолат, П.А. Хаймович, ФММ **48**, 1004 (1979).
22. В.А. Лихачев, В.В. Рыбин, ФТТ **18**, 163 (1976).
23. И.М. Неклюдов, В.И. Соколенко, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович, Патент Украины № 66649 (2006).
24. П.А. Хаймович, В.С. Хмелевская, И.А. Антошина, Е.Г. Замлер, Материалы V Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов», 17–21 ноября 2008 г., Черноголовка, с. 37.
25. П.А. Хаймович, Материалы XVII Петербургских Чтений по проблемам прочности, 10–12 апреля 2007 г., СПб, с. 139.
26. П.А. Хаймович, Патент Украины № 79726 (2007).
27. В.С. Оковит, П.А. Хаймович, Материалы 47 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 1–5 июля 2008 г., Н. Новгород, с. 98–99.
28. Л.В. Прозоров, А.А. Костава, В.Д. Ревтов, Прессование металлов жидкостью высокого давления, Машиностроение, Москва (1972).
29. Б.И. Береснев, Е.В. Трушин, Процесс гидроэкструзии, Наука, Москва (1976).
30. П.А. Хаймович, Патент Украины № 75155 (2006).
31. П.А. Хаймович, Материалы 53 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 2–5 октября 2012 г., Витебск.
32. П.А. Хаймович, Материалы XLVI Международной конференция «Актуальные проблемы прочности», 15–17 октября 2007 г., Витебск, с. 46.

P.A. Khaimovich

FROM HYDROEXTRUSION TO BAROCRYODEFORMATION

A distinctive feature of hydroextrusion, which is widely used today to improve the properties and deformation of metals and alloys, is that prior to deformation, the material is subjected to uniform compression, at which the subsequent deformation occurs. Both traditional hydroextrusion and new extrusion-based methods of metal processing can not be used at cryogenic temperatures. At the same time, at deep cooling, when processes of dynamic recovery are depressed, we can expect maximum possible concentration of defects and related high density of interfaces. In the present work, schemes similar to hydroextrusion are described, where the deformable object is also compressed prior to beginning of deformation, but these conditions are realized at cryogenic temperatures. The presented results of such exposure of some metals and alloys indicate the possibility of increase in their thermal stability by lowering of the temperature of deformation. Ultra-fine structure, which provides high mechanical properties, can be obtained at low degrees of deformation. The defect structures of high regularity were obtained, which are not observed in other types of deformation. The conclusion on the expediency of expanding the researches in this direction has been made.

Keywords: hydroextrusion, uniform, compression, barocryodeformation, cryogenic temperatures, metals, strength, ductility

Fig. 1. Schemes of hydroextrusion: *a* – general case of hydroextrusion, *б* – special case of hydroextrusion

Fig. 2. Different conditions of material deformation

Fig. 3. The structure of polycrystalline copper rolled at 300 (*a*), 77 (*б*) and 20.4 K (*в*) [19]

Fig. 4. The structure of polycrystalline copper, deformed by quasihydroextrusion at 300 (*a*), 190 (*б*), 125 (*в*), 77 (*г*) and 20.4 K (*д*) [20]

Fig. 5. The structure of polycrystalline copper, deformed by quasihydroextrusion at 77 K to 60% and then deformed by tension at room temperature until a neck [21]: *a* – in the neck zone, *б* – far from the neck

Fig. 6. Dependence of the limiting plasticity at break ϵ under hydrostatic pressure P

Fig. 7. Barocryodeformation of steel st50 at 77 K: *a* – special case, hardening 10–15%; *б* – general case (backpressure ~ 3 kbar), hardening 50–70% without discontinuities

Fig. 8. Barocryodeformation of Hf at 77 K: *a* – special case; *б* – general case (backpressure ~ 6 kbar)