

PACS: 62.20.Fe, 81.40.-z

П.А. Хаймович

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КВАЗИГИДРОЭКСТРУЗИЯ

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина
E-mail: pavel.41@bk.ru

Описаны методы и устройства, позволяющие осуществлять пластическую деформацию металлов и сплавов при криогенных температурах в условиях всестороннего сжатия. Приведены результаты применения этой технологии на некоторых металлах и сталях. Показано, что она позволяет формировать в металле структуры, обеспечивающие такие высокие упрочнение и термоустойчивость свойств, которые не могут быть реализованы при других видах обработки.

Понижению температуры пластического деформирования как фактору, способствующему достижению повышенных прочностных характеристик металлов и сплавов, три-четыре десятилетия назад уделялось большое внимание. При этом была убедительно показана роль диспергирования структуры, тем большего, чем ниже температура деформирования [1]. Однако постепенно интенсивность подобных исследований упала, так как по мере повышения степени деформации пластичность металла снижалась вплоть до хрупкости. Это объяснялось накоплением в металле микротрещин при всех использовавшихся в то время методах низкотемпературного деформирования, общим для которых являлось наличие значительных напряжений растяжения в очаге деформации.

Эффективно развиваемые в то время в ДонФТИ НАНУ методы гидроэкструзии свидетельствовали о преимуществах этого вида воздействия, когда материал побуждается продавливаться через очаг деформации, а не вытягивается тем или иным способом из него. Было доказано, что процесс образования микротрещин в случае гидроэкструзии может быть подавлен либо вообще исключен [2]. Но реализация гидроэкструзии, как известно, осуществлялась только при комнатной или повышенных температурах, так как для работы в области криогенных температур не существует жидких передающих давления сред.

Тем не менее в ХФТИ, продолжая попытки осуществления низкотемпературной гидроэкструзии, испытывали в качестве такой среды самые различные материалы. Задача свелась к поиску пусть и твердого тела, но многократно

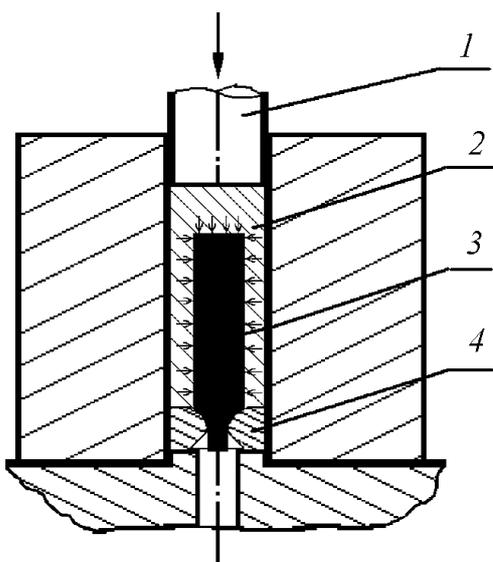


Рис. 1. Экструзионный узел для осуществления НТ КГЭ: 1 – пуансон, 2 – передающая давление среда, 3 – заготовка, 4 – матрица

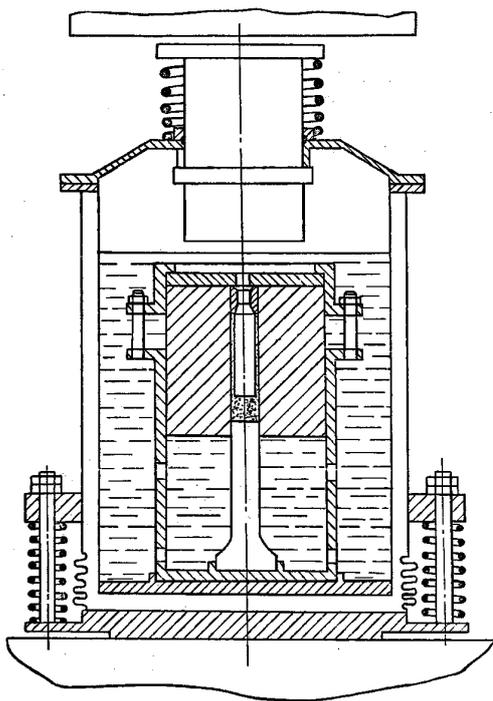


Рис. 2. Приставка к прессам для НТ КГЭ в среде сжиженных газов H_2 , He , требующих замкнутого контура для испаряющегося газа (патрубки для заливки охлажденного газа и выхода паров на рисунке не показаны)

уступающего по прочностным характеристикам обрабатываемому металлу, пластичного при низкой температуре деформирования и имеющего при этом низкий коэффициент упрочнения. В таком качестве из многих исследованных материалов наилучшие результаты показал индий. Однородность свойств получаемого экструдата оказалась такова, как если бы он деформировался под воздействием гидростатической среды. Но поскольку среда в действительности являлась твердым телом, то и метод был назван авторами «низкотемпературной квазигидроэкструзией» (НТ КГЭ) (рис. 1) [3].

Параллельно необходимо было решить задачу приложения усилий к экструзионному узлу в условиях низких температур. В первом устройстве усилием до 15 t, которое разрабатывалось для обычного выдавливания и представляло собой специализированный низкотемпературный пресс, реализована классическая схема опорная колонка–тяга, помещенные в сосуд Дьюара с хладагентом [4]. Был разработан и значительно более мощный (усилием до 200 t) пресс такого же типа. Отличался он тем, что для уменьшения охлаждения его гидросиловой системы от находящегося в среде хладагента (сжиженного газа) рабочего узла как опорная колонка, так и тяга должны были выполняться каждая из двух практически разомкнутых секций, смыкание которых предполагалось только в процессе нагружения прессы [5]. Однако реализована эта конструкция не была, а все последующие устройства для НТ КГЭ разрабатываются и изготавливаются как приставки к обычным промышленным прессам.

Общей их особенностью является то, что они размещаются в сосудах Дьюара, в которых внутреннее и наружное днища выполнены с возможностью взаимного осевого перемещения вплоть до смыкания (рис. 2) [6]. В отсутствие сжимающих усилий со стороны пресса днища разомкнуты, и сосуд Дьюара выполняет свои термоизолирующие функции. Под воздействием перемещающегося плунжера пресса днища смыкаются, реализуется процесс экструдирования, а после поднятия плунжера днища размыкаются, и сосуд восстанавливает свои качества теплоизолятора. Так как процесс экструдирования достаточно быстротечен (как правило, несколько десятков секунд), элементы пресса не успевают существенно охладиться.

В устройствах такой конструкции КГЭ в диапазоне температур 300–20 К был подвергнут широкий круг металлов и сплавов [7–10]. Ряд факторов свидетельствует, что в контейнере высокого давления действительно реализуются близкие к гидростатическим давления, побуждающие заготовку полностью истекать через матрицу, так что в пресс-остатке оказывается только передающая давление среда. В частности, вне зависимости от размеров применяющихся заготовок (максимальный диаметр до 12 mm) уровень упрочнения постоянен по сечению экструдата, что многократно проверялось как измерениями микротвердости, так и испытаниями на сжатие и на растяжение по методикам, описанным для технологии гидроэкструзии.

Если достижение высокого уровня упрочнения было итогом ожидаемым, то некоторые результаты представили интерес как отправная точка для более глубокого исследования обнаруженных особенностей структур, получаемых при этой обработке. Так, испытания на растяжение выявили связь очень высокого уровня механических характеристик (при отсутствии склонности к хрупкому разрушению), приобретаемых бескислородной поликристаллической медью при НТ КГЭ, с высокой регулярностью слоистой высокодисперсной дислокационной структуры, формирующейся при этом деформировании [11]. Обнаружено, что как только в образце по достижении предела текучести начинается пластическая деформация, эта регулярная структура лавинообразно перестраивается в мелкоячеистую, что сопровождается сбросом нагрузки, поскольку образовавшаяся при перестройке структура уже не способна выдерживать те напряжения, противостоят которым могла структура регулярная. Естественно, все это происходит на каком-то небольшом отрезке образца, где образуется шейка и протекает дальнейшая деформация вплоть до разрыва, т.е. имеет место локализация деформации. Структура остальной части образца сохраняет описанную выше регулярность.

На примере нержавеющей, аустенитной в исходном состоянии стали Х18Н10Т показано, что при деформировании в условиях одновременного воздействия всестороннего сжатия и криогенных температур возможно осуществление практически 100%-го γ - α -превращения с образованием мартенсита очень высокой дисперсности, что открывает новые возможности применения широко распространенного конструкционного материала [12].

Рост микротвердости, значительное повышение прочностных характеристик наблюдались практически у всех подвергшихся обработке металлов и сплавов. Величина равномерного удлинения в случае испытаний на растяжение у обработанного материала падала, однако хрупкое разрушение не наступало, поперечное сужение, как правило, составляло 80–90% и более.

Особо следует остановиться на тех примерах применения НТ КГЭ, когда оказывается определяющим для достижения положительного результата использование в качестве передающей давление среды твердого тела, а не жидкости. При исследованиях влияния НТ КГЭ на физико-механические свойства никеля деформированию подвергались монокристаллические образцы, ориентированные осями [100] и [110] относительно направления экструдирования, и образцы с так называемой «бамбуковой» структурой, когда образец фактически является крупнозернистым поликристаллом, но все его поперечное сечение занимает одно зерно [13]. На рентгенограммах монокристаллического никеля обеих ориентаций после КГЭ при 300 К имеют место сплошные кольца. С понижением температуры экструдирования до 77 и 20 К наблюдаются уже не кольца, а дугообразные рефлекссы, причем их тангенциальное размытие существенно больше у образцов, ориентированных осью [110] относительно направления экструдирования. В случае же КГЭ заготовки никеля с «бамбуковой» структурой при 77 К прошедший матрицу экструдат представлял собой заключенный в индиевую оболочку объект, где каждый из кристаллитов-зерен оказался в той или иной мере развернут относительно первоначальной оси.

Рентгенографические исследования таблеток, вырезанных из этих кристаллитов в сечении, перпендикулярном оси экструдирования, показали, что в большей или меньшей мере они ориентированы относительно этой оси направлением [112]. Иными словами, через матрицу одновременно продавливались образец и некоторое количество индия, и кристаллит в этой мягкой индиевой оболочке получал возможность разворачиваться в выгодном направлении без значительных локальных деформаций, приводящих к неравномерной повышенной плотности дефектов. Общая степень деформации тем не менее составляла около 60%. Это привело к значительному упрочнению (H_{μ} около 2100 МПа), большему, чем имело место в случае КГЭ, которое проводилось при $T_{\text{extr}} = 77$ К, степени деформации 60% при ориентации оси монокристалла [100] вдоль направления экструдирования. Но наиболее существенным оказался факт необычно высокой термической устойчивости металла, деформированного таким специфическим образом. Действительно, если монокристаллы с осями [110] и [100] относительно направления экструдирования ($T_{\text{extr}} = 77$ К) при полчасовых отжигах рекристаллизовались при 230 и 360°C соответственно, то кристаллы, имевшие возможность в рубашке индия сориентироваться так, что их направление [112] совпадало с осью экструдирования, оказались термически устойчивыми вплоть до 470°C (рис. 3, кривая 5).

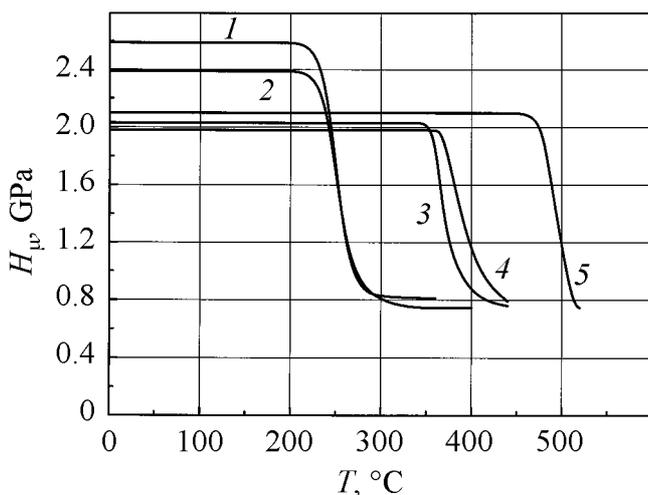


Рис. 3. Влияние получасовых нагревов на микротвердость экструдированного монокристаллического никеля. С направлением экструдирования совпадают оси: [110] (кривые 1, 2), [100] (3, 4), [112] (5). $T_{extr} = 77$ К – кривые 2, 4, 5; $T_{extr} = 20$ К – кривые 1, 3

Описанные выше условия, в которых деформировался крупнозернистый поликристалл никеля, близки к идеальным для выявления текстуры металла в конкретной области температур при конкретном виде деформирования. Действительно, при деформации относительно мелкозернистого металла зерна его должны разворачиваться в текстурном направлении, испытывая противодействие со стороны окружающих его кристаллитов этого же материала. А при квазигидроэкструзии поликристалла, содержащего практически одно зерно в сечении заготовки (как это было осуществлено в настоящей работе), зерно имеет возможность развернуться в выгодном направлении, не испытывая значительного внешнего сопротивления, поскольку оно находится в рубашке из индия – металла, который начинает течь при очень низких напряжениях.

Исследования, проведенные на широком круге металлов и сплавов, не только показали возможность достижения применением НТ КГЭ такого уровня физико-механических характеристик, который другими методами недостижим, но и обозначили пределы возможностей описанного метода. Один из недостатков состоит в том, что уровень сил всестороннего сжатия, во многом определяющий характер образующейся при экструдировании структуры, однозначно определяется заданной степенью деформации обрабатываемого объекта. Второй основной недостаток касается материалов с низкой пластичностью, которые могут растрескиваться при выходе из матрицы. Существовало понимание, в частности, благодаря работам сотрудников ДонФТИ [14], что решить эти проблемы можно приложением противодействия к выходящему из матрицы экструдату. Такой подход и был реализован в методах НТ КГЭ с противодействием, разработанных в ХФТИ [15].

На рис. 4 представлена схема одного из таких устройств. Оно содержит рабочую камеру 1 с пуансоном 2 и матрицей 3, заполненную твердой пластичной промежуточной средой 4, которая окружает заготовку 11. Устройство включает также заполненную твердой пластичной промежуточной средой 5 камеру противодействия 6, сообщающуюся с рабочей камерой через матрицу последней,

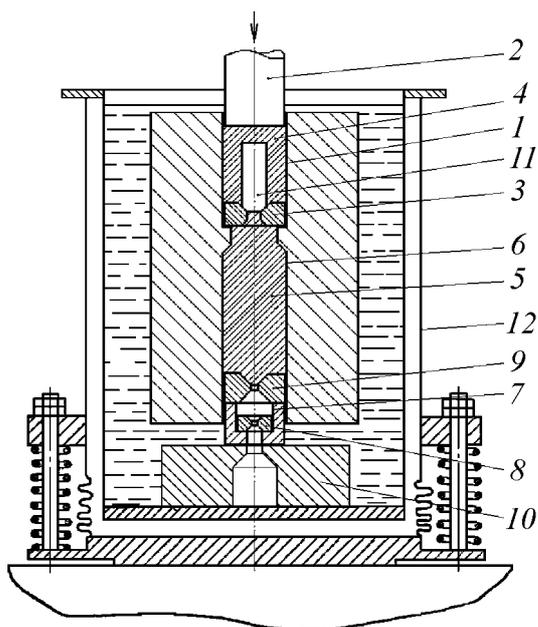


Рис. 4. Устройство для НТ КГЭ с противо­давлением

дополнительную камеру 7 с филь­рой 8, сообщающуюся с камерой противо­давления через подвижную дополнительную матрицу 9, выпол­ненную с возможностью осевого пе­ремещения в камере противо­давления. Дополнительная камера уста­новлена на опорном элементе 10. Все описанные выше детали разме­щены в сосуде Дьюара 12 специ­альной вышеописанной конструкции, содержащем хладагент. Наличие до­полнительной камеры диктуется не­обходимостью расширения уровня противо­давления.

Применением описанного мето­да оба упомянутых выше основных недостатка устройств, использо­вавшихся ранее, были устранены.

Уровень действующих на заготовку сил всестороннего сжатия в описанном устройстве можно задавать без связи со значением планируемой степени деформации заготовки. Это обеспечило дополнительное повышение проч­ностных характеристик обрабатываемых материалов, что определяется бо­лее высоким диспергированием структуры. С другой стороны, оказалось возможным при криогенных температурах деформировать материалы (кото­рые раньше при этих температурах успешно обрабатывать не удавалось) при сообщении этим материалам высоких механических характеристик (рис. 5).

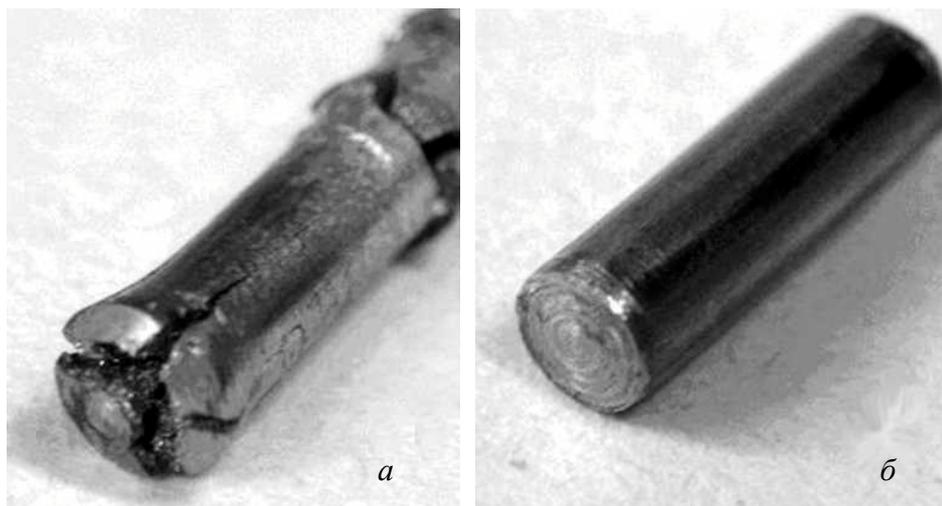


Рис. 5. Образцы углеродистой стали, подвергнутой упрочняющей обработке КГЭ при 77 К: *а* – без применения противо­давления (упрочнение 10–15%); *б* – с приме­нением противо­давления (упрочнение 50–70% при отсутствии нарушений сплошности)

Описанные методы воздействия на металлы и устройства для их реализации, обеспечивая возможность пластического деформирования металла в условиях всестороннего сжатия при криогенных температурах, позволяют достичь такого уровня физико-механических свойств монолитного металла, который другими видами воздействия недостижим.

1. *И.А. Гиндин, М.Б. Лазарева, В.П. Лебедев, Я.Д. Стародубов, В.М. Мацевитый, В.И. Хоткевич*, ФММ **24**, 347 (1967).
2. *Д.К. Булычев, Б.И. Береснев, М.Г. Гайдуков, Е.Д. Мартынов, К.П. Родионов, Ю.Н. Рябинин*, ФММ **18**, 437 (1964).
3. *Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович*, Проблемы прочности **10**, 116 (1975).
4. *И.А. Гиндин, С.Ф. Кравченко, Я.Д. Стародубов*, Приборы и техника эксперимента **6**, 206 (1970).
5. *В.У. Асанов, И.А. Гиндин, С.Ф. Кравченко, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович, С.Я. Чеканов, В.П. Яшин*, А.С. 846304 (СССР) (1981).
6. *В.У. Асанов, А.В. Мац, П.А. Хаймович*, в сб.: Физика и техника высоких давлений, Наукова думка, Киев (1983), вып. 14, с. 64–65.
7. *И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, М.П. Старолат, П.А. Хаймович*, ФММ **40**, 403 (1975).
8. *А.В. Мац, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович*, ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники» № 1, 161 (2002).
9. *В.К. Аксенов, А.В. Мац*, в сб.: Физика и техника высоких давлений, Наукова думка, Киев (1989), вып. 31, с. 31–36.
10. *В.В. Брык, И.М. Неклюдов, В.И. Соколенко, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович*, Металлофиз. новейшие технол. **27**, 551 (2005).
11. *И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, М.П. Старолат, П.А. Хаймович*, ФММ **48**, 1004 (1979).
12. *А.С. Кальченко, А.В. Мац, И.М. Неклюдов, В.И. Соколенко, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович*, Металлофиз. новейшие технол. **27**, 585 (2005).
13. *И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович*, Металлофизика **10**, вып. 3. 97 (1988).
14. *В.З. Спусканюк, В.А. Богданов, Я.Е. Бейгельзимер, И.М. Коваленко*, в сб.: Физика и техника высоких давлений, Наукова думка, Киев (1989), вып. 32, с. 72–76.
15. *П.А. Хаймович*, Патент Украины № 75155 (2006).

P.A. Khaimovich

LOW-TEMPERATURE QUASI-HYDROEXTRUSION

Methods and devices for plastic deformation of metals and alloys at cryogenic temperatures in conditions of uniform compression are described. The results of using this technology for several metals and steels are presented. The opportunity of obtaining metal structures which provide such high hardening and heat resistance of the properties, which cannot be implemented by other kinds of deformation, is shown.

Fig. 1. A device for realization of the low-temperature quasi-hydroextrusion (LT QHE): 1 – piston, 2 – medium that transmits pressure, 3 – preform, 4 – die

Fig. 2. A device for the presses for the LT QHE in medium of liquefied gas H₂, He, which demand a closed loop for evaporating gas (branch pipes for filling a vessel with liquefied gas and for evaporating-fluid escapement are not shown)

Fig. 3. Influence of half-hour's heatings on microhardness of extruded monocrystalline nickel. Axes coincide with a direction of extrusion: [110] – (curves 1, 2), [100] (3, 4), [112] (5). $T_{\text{extr}} = 77 \text{ K}$ – curves 2, 4, 5; $T_{\text{extr}} = 20 \text{ K}$ – curves 1, 3

Fig. 4. A device for the LT QHE with backpressure

Fig. 5. Samples of carbon steel subjected to QHE at 77 K: *a* – without application of backpressure (10–15% hardening); *b* – with application of backpressure (50–70% hardening with no crack formation)