

PACS: 62.20.Fe, 81.40.-z

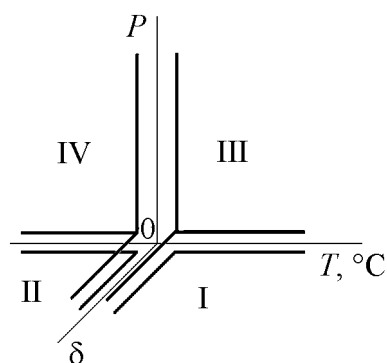
А.В. Мац, П.А. Хаймович

## БАРОКРИОДЕФОРМИРОВАНИЕ СТАЛИ X18H10T

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

*Описан метод обработки металлов барокриодеформированием (БКД) и показано место этого вида воздействия в ряду известных методов повышения физических свойств металлов пластическим деформированием. Приведена информация о тех возможностях, которые предоставляет БКД для повышения механических свойств стали X18H10T в широкой температурной области. Предложены пути совершенствования методов упрочнения металлов с применением БКД.*

В последнее время для упрощения терминологии барокриодеформированием стали называть способ воздействия на металлы, при котором их пластическое деформирование осуществляется в условиях значительных сил всестороннего сжатия при криогенных температурах [1]. В предыдущие годы этот способ обработки именовали низкотемпературным квазигидроэкструдированием [2].



**Рис. 1.** «Мир деформации»: I – прокатка, волочение и т.п. при  $T \geq 300$  К; II – прокатка, волочение и т.п. при криогенных температурах; III – деформирование металла, находящегося в условиях всестороннего сжатия, при  $T \geq 300$  К; IV – БКД

В настоящее время пластическое деформирование металлов и сплавов осуществляют в самых различных условиях. Место БКД в сообществе этих способов иллюстрирует схема, приведенная на рис. 1. Вплоть до XX в. реализовывалась только область I в представленной схеме. По мере совершенствования техники сжижения газов и получения температур, существенно более низких, чем комнатная, многие металлы и сплавы стали подвергать пластическому деформированию при низких (криогенных) температурах, т.е. начали осваивать область II. Одним из важнейших следствий такого деформирования является возможность формировать в материале структуру очень высокой дисперсности, чему уделяется большое внимание, особенно в последние десятилетия.

тилетия. Однако ощутимое, а иногда и катастрофическое снижение пластичности металла при использовании традиционных (прокатка, волочение, выдавливание и т.д.) методов деформирования при криогенных температурах затормозило развитие работ в этом направлении.

В первой половине XX в. стали осуществлять эксперименты по деформированию металлов в условиях всестороннего сжатия в жидкой среде, находящейся при высоком (в десятки тысяч атмосфер) давлении. Обнаружилось, что в этих условиях способны пластически деформироваться в ряде случаев даже обычно хрупкие материалы, причем многие физико-механические свойства металлов и сплавов при таком деформировании существенно улучшаются. То есть исследователи вошли уже в область III (см. рис. 1), причем очень большой вклад в освоение этой области во второй половине XX в. внес ДонФТИ, в течение ряда лет бывший головной организацией в СССР по гидроэкструзии.

Естественное желание объединить способность гидроэкструзии к деформированию низкопластичных материалов и возможность посредством криодеформирования достигать высокодефектной структуры и связанной с этим уникальности физических свойств не было реализовано ввиду отсутствия жидких сред, способных гидростатически передавать давление при низких температурах. Выход был найден в последней четверти XX в. в Харьковском ФТИ, где в качестве передающей давление среды применили не жидкость, а твердое тело, обладающее низким напряжением течения при криогенных температурах (иттрий) [3]. Эксперименты показали, что действительно таким образом возможно достичь требуемой гидростатичности в объеме канала высокого давления, где размещается заготовка, с тем чтобы она могла без остатка продавливаться этой сжатой средой через матрицу. При этом однородность деформирования металла по объему экструдата оказывается практически такой же, как и при обычной жидкостной экструзии при нормальных температурах. Так началось освоение области IV представленной выше схемы, а вид воздействия был назван, как выше упоминалось, низкотемпературной квазигидроэкструзией.

Необходимость в подобном предисловии вызвана тем, что и сегодня такой способ воздействия на металлы и сплавы, который стали называть барокриодеформированием, недостаточно распространен, в то время как его применение открывает очень широкие перспективы [4]. Эффективность БКД проверена на десятках металлов и сплавов, но в первую очередь интерес представляют материалы практического использования. Поэтому данная статья посвящена исследованию возможностей повышения прочностных характеристик одной из наиболее применяемых нержавеющей сталей – X18H10T.

### **1. Исходный материал, методы обработки и исследования**

Предназначенные для БКД заготовки из стали X18H10T подвергали гомогенизирующему отжигу при 1050°C с последующей закалкой в воду. Струк-

тура стали после такой обработки представляла собой чистый аустенит со средним размером зерна  $\sim 50 \text{ }\mu\text{m}$ , пределы текучести и прочности составляли соответственно 220 и 650 МПа, удлинение до разрыва – 42%, микротвердость – около 1500 МПа. Эти заготовки подвергали БКД при 77 и 20 К, а часть из них (для сравнения) – при комнатной температуре. Для оценки приобретаемых сталью свойств измеряли микротвердость, проводили испытания на растяжение, осуществляли электронно-микроскопические и рентгенографические исследования.

Необходимо указать, что все приведенные ниже результаты получены с применением **частного** случая БКД, при котором уровень всестороннего давления, действующего на заготовку, в каждый момент пропрессовывания ее через матрицу однозначно определяется напряжением течения обрабатываемого материала. Напомним, что **общий** случай БКД [5,6] предусматривает приложение к заготовке дополнительно встречного усилия противодействия, препятствующего продавливанию ее через матрицу. Возможность задавать эти усилия позволяет управлять величиной давления, действующего в канале рабочего цилиндра на заготовку, и поднимать его до уровня, достаточного для обеспечения пластического течения даже весьма низкопластичных материалов [7].

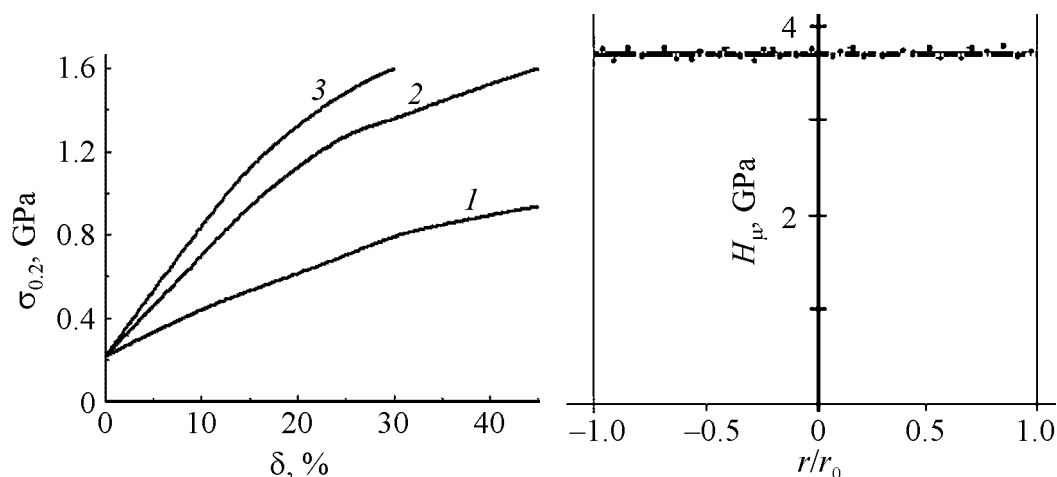
## 2. Свойства стали X18H10T непосредственно после БКД

Влияние понижения температуры деформирования на предел текучести стали иллюстрирует рис. 2. Изменения микротвердости и прочности с ростом степени деформации при БКД имеют аналогичный характер.

Высокий уровень прочностных характеристик этой стали, достигаемый уже при относительно небольших (30–40%) степенях деформации БКД, обеспечивается (как свидетельствуют электронно-микроскопические и рентгенографические исследования) благодаря практически полному  $\gamma$ – $\alpha$ -переходу при очень высокой дисперсности образующейся мартенситной структуры.

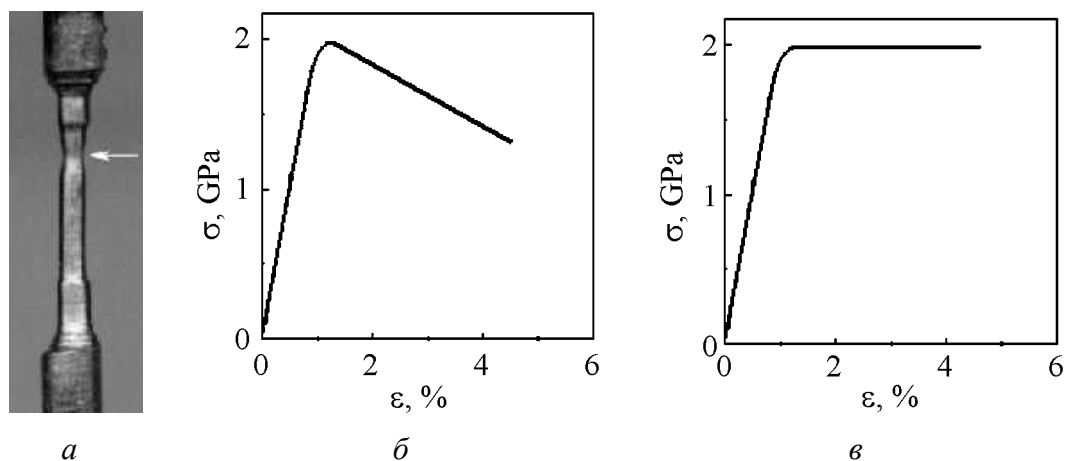
Немаловажно, что имеет место высокая однородность деформирования по объему стали, испытывшей БКД (рис. 3), причем не только на экструдатах диаметром 4–5 мм, на которых выполнен основной объем исследований, но и при диаметре экструдатов 10–12 мм – том максимуме, который позволял получить использовавшийся 50-тонный пресс.

Необходимо остановиться на особенностях протекания пластической деформации при растяжении БКД-стали (рис. 4,б,в). Материал деформируется упруго до момента начала образования шейки, и вся последующая пластическая деформация вплоть до разрыва имеет место только в области этой шейки. Иными словами, равномерное удлинение отсутствует, в то время как поперечное сужение при доведении образца до разрыва достигает 80–90%, т.е. в области шейки имеет место большая пластическая деформация. Этот факт заслуживает отдельного внимательного рассмотрения с учетом, что растяжению



**Рис. 2.** Испытания на растяжение при комнатной температуре стали X18H10T после БКД при 300 (1), 77 (2) и 20.4 К (3)

**Рис. 3.** Распределение  $H_{\mu}$  по сечению экструдата, полученного БКД на 35% при 77 К



**Рис. 4.** Результаты испытания на растяжение образца стали, подвергнутого БКД: *а* – образец, не доведенный до разрушения в разрывной машине, стрелкой показана шейка; *б, в* – диаграммы растяжения соответственно машинная и пересчитанная в истинные значения

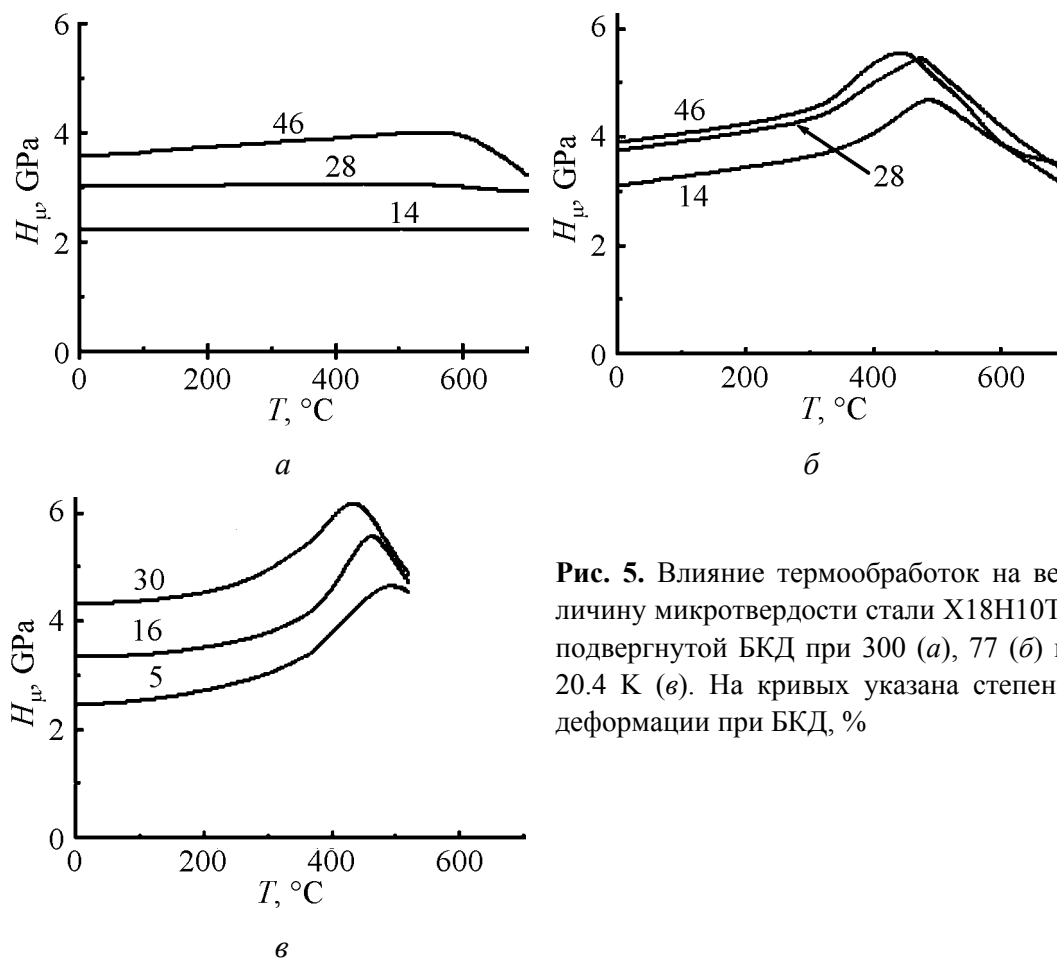
подвергается структура, сформированная в экстремальных условиях одновременного воздействия на деформируемый материал сил всестороннего сжатия и глубокого охлаждения.

### 3. Влияние термообработок на сталь X18H10T, претерпевшую БКД

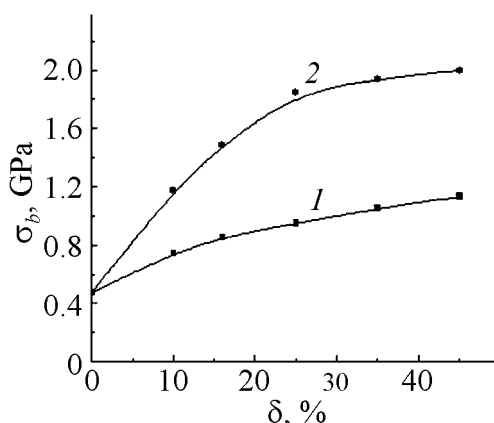
Отличительным качеством стали X18H10T является то, что, имея в исходном состоянии чисто аустенитную структуру (после гомогенизирующего отжига), при пластическом деформировании эта сталь претерпевает  $\gamma$ – $\alpha$  переход, причем концентрация образующегося мартенсита тем выше, чем больше степень деформации и чем ниже температура деформирования. Деформированием при комнатной температуре даже на высокие степени таки-

ми традиционными видами обработки, как прокатка, волочение, экструзия, получить концентрацию мартенсита выше 30–40% затруднительно. Понижение температуры деформирования до 77 К и ниже позволяет довести ее значение до 80–90%, но определенное количество аустенита все равно наблюдается, т.е. сталь остается двухфазной. Характерным качеством стали при этом является возможность повышения ее характеристик за счет состаривания полученного мартенсита, которое тем более эффективно, чем выше концентрация мартенсита [8]. Иначе говоря, сталь непосредственно после осуществления БКД фактически представляет собой полуфабрикат, при этом для повышения ее механических характеристик важной задачей является определение оптимальных условий состаривающей термообработки. В структуре стали, бародеформированной при комнатной температуре, процессы старения проявляют себя несущественно, что и не удивительно, т.к. в этих условиях деформирования лишь небольшая часть металла переходит в мартенсит (рис. 5,а).

Совсем иначе обстоит дело, когда старению подвергаются образцы, испытывавшие БКД при 77 и 20 К (рис. 5,б,в). На зависимостях микротвердости этих образцов от температуры при полчасовых отжигах наблюдаются четкие максимумы, характеризующие оптимальные температуры протекания



**Рис. 5.** Влияние термообработок на величину микротвердости стали X18H10T, подвергнутой БКД при 300 (а), 77 (б) и 20.4 К (в). На кривых указана степень деформации при БКД, %



**Рис. 6.** Прочность при комнатной температуре стали X18H10T после БКД при 300 (1) и 77 К (2) и состаривающего отжига

процессов старения, обеспечивающие в данных условиях максимально упрочненное состояние стали. Естественно, чем выше была степень деформации при БКД, тем большего упрочнения при старении удастся достичь в силу более высокой концентрации мартенсита, но по температуре пик при этом смещается на два-три десятка градусов вниз. Тем не менее оптимальная область температуры состаривания (450–500°С) на 100–150 градусов выше, чем у стали, деформированной в криогенных условиях традиционными методами, и величина упрочнения су-

щественно выше (рис. 6). Поведение состаренной после БКД стали при испытаниях на растяжение аналогично описанному выше в подразделе 2, т.е. при отсутствии равномерного удлинения имеет место образование шейки и протекание в ней пластической деформации, обеспечивающей поперечное сужение вплоть до 80–90%.

Приведенные выше результаты получены при комнатной температуре испытаний на растяжение. И хотя рост предела текучести в 7–8 раз по сравнению с исходным состоянием (с 200–220 до 1900–2000 МПа, БКД при 77 К) является высоким результатом (при отсутствии склонности к хрупкому разрушению), представляет важность информация о температурной устойчивости достигнутого высокопрочного состояния.

Как испытания на растяжение при повышенных температурах, так и длительная (64 h) выдержка в этих условиях показали, что вплоть до 500°С характеристики претерпевшей БКД при 77 К и состаренной стали стабильны, причём предел текучести ее при 500°С достигает 1600–1700 МПа. Полученный результат заставляет по-новому посмотреть на устоявшееся мнение, что чем ниже температура упрочняющей обработки, тем ниже температурная стабильность получаемого структурного состояния. Пластическое деформирование при всестороннем сжатии в условиях глубокого охлаждения обеспечило устойчивость прочностных характеристик этой стали при повышенных температурах.

Приведенные выше результаты говорят о высокой эффективности БКД как средства получения высокопрочного состояния стали, однако в ряде случаев требуется, чтобы при повышенных механических характеристиках сталь имела не мартенситную, а аустенитную структуру, в частности в связи с тем, что это состояние немагнитное.

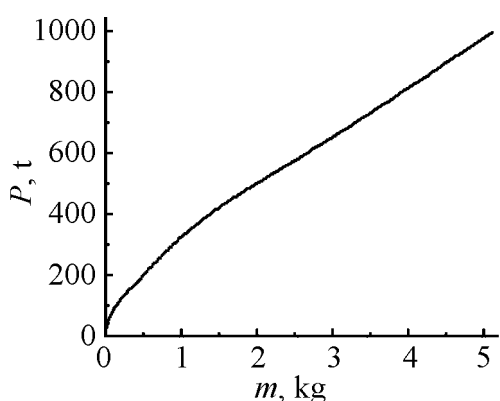
Известны методы формирования аустенита, предусматривающие создание в стали путем деформирования мартенситной фазы, старение получен-

ного мартенсита, последующий кратковременный нагрев до температуры, превышающей температуру конца превращения мартенсита в аустенит, и закалку на аустенит [9]. Однако, не будучи способными обеспечить монофазное мартенситное высокодисперсное состояние перед кратковременным нагревом, эти методы не могли привести и к образованию однородного высокодисперсного аустенита, что, в свою очередь, не позволяло реализовать резервы повышения уровня прочностных характеристик стали в аустенитном состоянии.

Как показано выше, особенностью БКД является то, что оно обеспечивает практически монофазное мартенситное состояние стали при очень высокой его дисперсности. Задача превращения этого мартенсита в аустенит такой же дисперсности сводилась к поиску режимов термообработки, которые привели бы к превращению мартенсита в аустенит во всем объеме металла, но не позволили бы начаться росту новообразованных зерен аустенита. Эти режимы оказались очень критичны как к указанному диапазону температур нагрева, так и ко времени выдержки при этих температурах. Однако они позволили получать аустенит с такими характеристиками, которые достичь иными методами маловероятно. Средний размер довольно равноосных зерен аустенита составил 60 nm, максимальный не превышал 80–90 nm, сами зерна свободны от дислокаций. Границы зерен достаточно прямолинейны, отсутствуют изгибные контуры у границ и их стыков, что свидетельствует о высокой степени равновесности структуры. Предел текучести стали, имеющей аустенитную структуру с приведенными выше характеристиками, достигает 1.0–1.05 GPa (0.22–0.25 GPa в исходном гомогенизированном состоянии) без снижения пластичности (42–45%). Следует отметить, что сталь в таком структурном состоянии сохраняет высокие механические характеристики при повышении температуры вплоть до начала роста зерен. Это еще один пример того, как деформирование в условиях глубокого охлаждения обеспечивает механическую устойчивость металла в широкой температурной области.

#### 4. Резервы и перспективы

Основная часть описанных выше исследований была проведена на экструдатах, полученных из заготовок диаметром 4–5 mm. Однако БКД при 77 K осуществлялось и на заготовках большего размера при использовании контейнера высокого давления с диаметром канала 20 mm. Важным результатом оказалось то, что увеличение размера исходной заготовки никак не влияло на получаемые свойства. Необходимо учитывать, что на размер предназначенной для БКД заготовки накладывает ограничение величина предельных усилий, которые способен развивать пресс. Полученная расчетным путем ориентировочная зависимость массы заготовки, которую еще возможно продеформировать, от предельного усилия прессы представлена на рис. 7. Так, например, на прессах с максимальным усилием в 600–1000 t



**Рис. 7.** Зависимость предельных усилий прессы для осуществления БКД при 77 К от массы, предназначенной для обработки заготовки (оценка)

можно было бы получать экструдаты массой в 3–5 kg, которые после описанных выше термообработок, обеспечивающих стали высокую механическую устойчивость в широких температурных пределах, оказались бы способны найти практическое применение.

Как следует из рис. 2 и 5, значительный прирост упрочнения обеспечивает понижение температуры БКД от 77 до 20 К, но, к сожалению, в настоящее время не разрешается работать с жидким водородом как хладагентом. Не реализовано в необходи-

мых масштабах и ожижение неона, который в ряде случаев мог бы использоваться как весьма удобный заменитель водорода ввиду небольшого отличия температур конденсации этих газов (27 К – у неона, 20.4 К – у водорода). Кроме того, определенные сложности представляет необходимость для этих газов иметь замкнутый контур, что усложняет конструкцию деформационных устройств. В то же время имеются данные, что существенный выигрыш в повышении прочностных характеристик металла можно получить, если использовать не **частный** случай БКД, а **общий** (см. подраздел 1). Хотя его применение и требует усложнения деформационного устройства, но достигаемые результаты (предел текучести 2500 МПа и выше для стали X18H10T) позволяют рассматривать как перспективный такой метод воздействия на эту сталь.

1. П.А. Хаймович, Материалы V Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций», 12–14 марта 2008 г, Оренбург, т. 1, с. 33–39.
2. П.А. Хаймович, ФТВД **17**, № 2, 12 (2007).
3. Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович, Проблемы прочности **10**, 116 (1975).
4. П.А. Хаймович, Изв. ВУЗов. Физика **50**, № 11, 13 (2007).
5. П.А. Хаймович, Материалы 47-й Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 1–5 июля 2008 г., Н. Новгород, с. 95–97.
6. П.А. Хаймович, Патент Украины №75155 (2006).
7. P.A. Khaimovich, Science & Technology center in Ukraine, Report (2006), p. 157.
8. С.Б. Рожкова, А.Л. Осинцева, Металловедение и термическая обработка металлов № 2, 63 (1975).
9. Ю.Н. Гойхенберг, М.М. Штейнберг, Д.А. Мирзаев, М.А. Смирнов, А.с. СССР 427069 (1971).

*А.В. Мац, П.А. Хаймович*

## БАРОКРІОДЕФОРМУВАННЯ СТАЛІ Х18Н10Т

Описано метод обробки металів барокріодеформуванням (БКД) і показано місце його у ряді відомих методів підвищення фізичних властивостей металів пластичною деформацією. Приведено інформацію про ті можливості, які надає БКД для підвищення механічних властивостей сталі Х18Н10Т в широкій температурній області. Запропоновано шляхи удосконалення методів зміцнення металів із застосуванням БКД.

*A.V. Mats, P.A. Khaimovich*

## BAROCRYODEFORMING THE X18H10T STEEL

A method of metal treatment by barocryodeforming (BCD) is described and the place of such an influence among the known methods of improving the physical properties of metals by plastic deformation is shown. Information about the possibilities given by BCD for the rise of mechanical properties of the X18H10T steel in a wide temperature range is presented. The ways to make the methods of metal hardening more perfect with the use of BCD are proposed.

**Fig. 1.** «The world of deformation»: I – rolling, drawing, etc. at  $T \geq 300$  K; II – rolling, drawing, etc. at cryogenic temperatures; III – deformation of metal in conditions of uniform compression at  $T \geq 300$  K; IV – BCD

**Fig. 2.** Room-temperature tensile tests of X18H10T steel after BCD at 300 (1), 77 (2) and 20.4 K (3)

**Fig. 3.** Distribution of  $H_{\mu}$  over the section of extrudate after a 35% BCD at 77 K

**Fig. 4.** Results of the tensile tests for steel sample subjected to BCD:  $a$  – sample not brought to destruction in a tension machine, a neck is shown by arrow;  $\bar{\sigma}$ ,  $\epsilon$  – tension diagrams (machine and recalculated to true values, respectively)

**Fig. 5.** Influence of heat treatments on  $H_{\mu}$  of X18H10T steel after BCD at 300 ( $a$ ), 77 ( $\bar{\sigma}$ ) и 20.4 K ( $\epsilon$ ). At the curves the degree of deformation at BCD, % is indicated

**Fig. 6.** The room-temperature tensile strength of X18H10T steel after BCD at 300 (1) and 77 K (2) and age annealing

**Fig. 7.** Dependence of the limiting force of press on mass of initial billet to be treated by BCD at 77 K (estimate)