

PACS: 62.20.Fe, 81.40.-z

П.А. Хаймович

## О ПРАКТИЧЕСКОМ ПРИМЕНЕНИИ БАРОКРИОДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ X18H10T

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

Статья поступила в редакцию 31 июля 2016 года

*Описано применение стали X18H10T при изготовлении ответственных элементов устройств для криодеформирования металлов и для измерения их механических свойств при повышенных температурах, ставшее возможным благодаря использованию для обработки этой стали методов барокриодеформирования (БКД). Обращено внимание на особенности конструкции устройств для БКД и на технологии их применения, определяемые использованием в этих устройствах в качестве среды, передающей давление, твердого тела, достаточно пластичного при криогенных температурах.*

**Ключевые слова:** пластическая деформация, всестороннее сжатие, барокриодеформирование, криогенные температуры, сталь X18H10T

*Описано застосування сталі X18H10T при виготовленні відповідальних елементів пристроїв для криодеформування металів і для вимірювання їхніх механічних властивостей при підвищених температурах, що стало можливим завдяки використанню для обробки цієї сталі методів барокріодеформування (БКД). Звернуто увагу на особливості конструкції пристроїв для БКД і на технології їхнього застосування, які визначаються використанням у цих пристроях в якості середовища, що передає тиск, твердого тіла, досить пластичного при криогенних температурах.*

**Ключові слова:** пластична деформація, всебічне стиснення, барокріодеформування, криогенні температури, сталь X18H10T

Среди направлений воздействия на металлы с целью повышения дисперсности их структуры, которые предусматривают их пластическое деформирование, особое место занимает деформирование при криогенных температурах. Возможность повышения механических характеристик деформированием в таких условиях известна давно [1]. Однако снижение пластичности и даже охрупчивание в результате этого воздействия, а также повышенная сопротивляемость материала формоизменению с понижением температуры деформирования привели со временем к отказу от поисков методов практического применения обработки металлов в указанных условиях. Новый толчок исследованиям в этом направлении дали работы, где пластическое деформирование при криогенных температурах стали проводить при воздей-

ствии сил всестороннего сжатия путем низкотемпературного квазигидроэкструдирования, которое чаще называется барокриодеформированием [2]. В результате была показана возможность осуществления пластического деформирования при низких температурах широкого круга металлов и сплавов без их охрупчивания, при хорошей однородности упрочнения по объему деформируемого металла и при высоком уровне этого упрочнения [3].

Признанным фактом считалось, что ахиллесовой пятой объектов, которые упрочнялись методами криодеформирования (деформирования при низких температурах), была низкая термоустойчивость свойств, приобретенных вследствие снижения температуры пластического деформирования. Чем ниже становилась температура деформирования, тем раньше можно было ожидать разупрочнения металла за счет процессов возврата. Естественно, что вопрос о термоустойчивости свойств после БКД не оставался без внимания с самого начала развития этой технологии.

В работе [4] на таких модельных материалах, как медь и никель, подвергнутых БКД, была обнаружена более высокая стабильность свойств при нагреве, чем в случае других видов криодеформирования этих металлов. Однако, естественно, интерес представлял уровень термоустойчивости свойств конструкционных материалов, упрочненных БКД.

Особое место в ряду таких материалов занимают аустенитные в исходном состоянии хромоникелевые стали, претерпевающие мартенситное превращение при их пластическом деформировании. Чем больше деформация и ниже температура деформирования, тем больший объем металла испытывает превращение. Исследователи, подвергавшие эти стали деформированию волочением, прокаткой и сжатием, обнаружили, что старение образовавшегося деформационного мартенсита при нагреве приводило к значительному приросту прочностных характеристик стали, причем максимум этого прироста приходился на 300–350°C [5].

От традиционных видов деформирования БКД выгодно отличается тем, что наличие всестороннего сжатия при деформировании обуславливает как высокую однородность распределения дефектов в металле при отсутствии микронесплошностей любого типа, так и их высокую плотность, что в результате при отеплении после завершения криодеформирования приводит к высокой концентрации границ раздела. Следует отметить, что при БКД уже при степенях деформации 25–30% в стали X18H10T реализуется практически полный  $\gamma$ - $\alpha$ -переход, т.е. в итоге ее структура представляет собой мартенсит очень высокой дисперсности [6]. Изменение предела текучести стали, барокриодеформированной на 35% в результате состаривающего нагрева, иллюстрирует рис. 1.

Температурный максимум процесса старения мартенсита приходится на 450–500°C, причем предел текучести стали X18H10T при испытании на растяжение при комнатной температуре достигает 1800–2000 МПа. Но достигнутое структурное состояние этой стали первоначально нашло практическое

применение не при комнатной температуре. Испытания на сжатие при 550°C обнаружили, что вкладыши захватов, между которыми был размещен образец из состаренной после БКД стали, оказались менее прочными, чем исследуемый материал (рис. 2). В дальнейшем для проведения испытаний различных материалов на сжатие до температур 500–550°C были изготовлены вкладыши именно из такой состаренной после БКД стали X18H10T, что явилось первым практическим применением метода БКД. Для оценки устойчивости данного структурного состояния сталь подвергали многочасовому пребыванию при 500°C, но это никак не отразилось на ее механических свойствах, проверенных как при комнатной, так и при повышенных температурах (при 500°C предел текучести при испытаниях на растяжение составил 1600–1700 МПа, на сжатие ~ 1800 МПа).

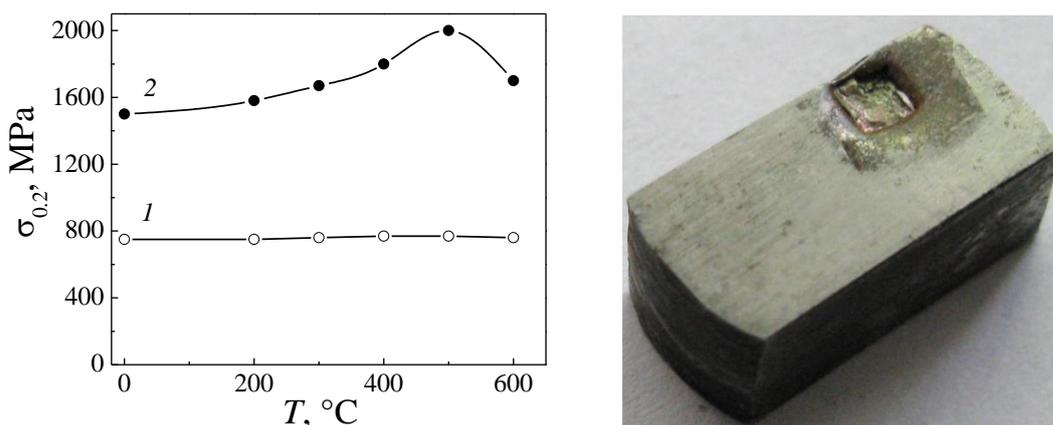


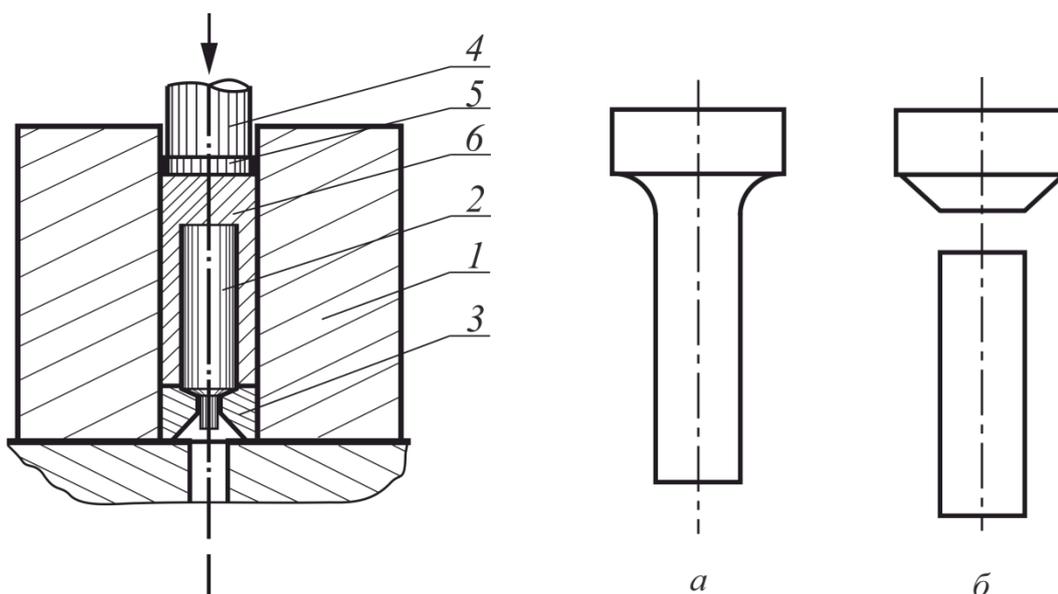
Рис. 1. Зависимость предела текучести стали X18H10T, подвергнутой БКД на 35% при 300 (1) и 77 К (2), от температуры получасовых отжигов

Рис. 2. Вкладыш захвата, потерявший форму во время испытаний на сжатие при 550°C образца, вырезанного из претерпевшей БКД и состаренной стали X18H10T

Подвергнутая барокриодеформированию сталь X18H10T нашла применение и при криогенных температурах, а именно в устройстве для осуществления БКД. Необходимо напомнить, что отличительной чертой этого вида воздействия является то, что деформирование объекта осуществляется в условиях всестороннего сжатия. Если при обычной гидрокстружии всестороннее сжатие обеспечивается той или иной жидкой средой, то при криогенных температурах в качестве передающей давление среды приходится использовать твердое тело, пластичность которого при температуре деформирования многократно превышает пластичность деформируемого объекта. Одним из наиболее приемлемых материалов, обеспечивающих всестороннее сжатие, является индий.

Применение твердого тела в качестве передающей давление среды значительно упрощает конструкцию деформационного узла (рис. 3), состоящего из контейнера высокого давления 1, в канале которого размещается заготов-

ка 2, упирающаяся в матрицу 3. В противоположный конец канала контейнера введен пуансон (плунжер) 4, осуществляющий через уплотняющую шайбу 5 давление на промежуточную среду 6. Вязкость этой промежуточной среды по сравнению с жидкостями, применяемыми при традиционной гидроэкструзии, настолько велика, что нет необходимости в каких-либо специальных средствах для удержания этой среды в канале высокого давления, что представляет собой одну из самых больших сложностей в изготовлении и эксплуатации жидкостных устройств высокого давления. Особо следует отметить, что этот фактор определяет безопасность устройств с твердой средой в случае разрушения контейнера высокого давления: в отличие от жидкой среды, истечение которой с высокой скоростью представляет большую опасность для персонала, сброс давления в твердой среде не сопровождается ее разлетом.



**Рис. 3.** Деформационный узел для БКД: 1 – контейнер высокого давления; 2 – заготовка; 3 – фильера; 4 – пуансон; 5 – уплотняющая шайба; 6 – передающая давление среда

**Рис. 4.** Цельный (а) и составной (б) пуансоны

Устройства для БКД в изготовлении и эксплуатации относительно просты, причем оказалось возможным реализовать и очень важное упрощение в конструкции пуансона (плунжера). В отличие от традиционного пуансона (рис. 4,а), который имеет цилиндрическую часть (рабочее тело) и расширенную (головку) и представляет собой единое целое, в пуансоне для БКД эти две части являются двумя отдельными элементами (рис. 4,б). В силу очень высоких напряжений, реализующихся в процессе деформирования в пуансоне, он является наиболее слабым звеном в конструкции устройства для

БКД: при достижении критических напряжений его цилиндрическая часть осаживается либо разрушается.

Изготовление нового пуансона по схеме рис. 4,а из материала соответствующего высокого качества является большой проблемой. Дело упрощается, если необходимо изготовить только его цилиндрическую часть (при условии конструкции по схеме 4,б). Головки пуансонов разрушаются редко, да и требования к прочностным характеристикам материала головки ниже, чем к материалу цилиндрической части. На практике отдельно изготовленные головку и рабочее тело просто склеивают (главное, чтобы прочность соединения была достаточна для сборки устройства для БКД), и с началом приложения усилий сборный пуансон работает как одно целое. Если даже после окончания эксперимента при разборке деформационного узла обнаруживается, что головка отделилась от цилиндрической части, то их просто повторно склеивают и пуансон как единое целое готов для нового эксперимента. К сожалению, в последние годы возникла проблема в связи с исчезновением высоколегированных сталей, подходящих для изготовления описываемых цилиндрических частей пуансонов. Однако эту проблему в определенной степени (как и в вышеописанном примере с высокотемпературными испытаниями на сжатие) оказалось возможным решить с применением БКД.

В настоящее время БКД осуществляется в устройствах трех «калибров» – с диаметром канала контейнера высокого давления 7, 14 и 20 mm. Если для среднего и большого «калибров» проблема с материалом для пуансонов не решена, то для малого оказалось возможным в качестве исходного материала использовать экструдаты стали X18H10T, полученные методом БКД на устройстве «среднего» калибра и подвергнутые затем оптимизирующим термообработкам. Пуансоны с цилиндрической частью из обработанной таким образом стали X18H10T при 77 К выдерживают нагрузку до 3 GPa, т.е. обеспечивают в канале контейнера давление до 30 kbar, чего не возможно достичь с помощью пуансонов, изготовленных из имеющихся в распоряжении легированных сталей.

Как следует из описанных выше примеров, пластическое деформирование стали X18H10T в экстремальных условиях одновременного воздействия больших сил всестороннего сжатия и криогенных температур позволяет достигать ее высокого устойчивого упрочнения. Это, в свою очередь, дает возможность заменять данной сталью специальные сплавы как при повышенных, так и при криогенных температурах. Использование в качестве среды, передающей давление, твердого тела, обладающего высокой пластичностью при криогенных температурах, не только оказывается полезным с точки зрения безопасности экспериментов при высоких давлениях, но и упрощает конструкцию экструзионных устройств, предназначенных для работы при низких температурах.

1. И.А. Гиндин, М.Б. Лазарева, В.П. Лебедев, Я.Д. Стародубов, В.М. Мацевитый, В.И. Хоткевич, ФММ **24**, 347 (1967).
2. П.А. Хаймович, в кн.: Перспективные материалы, т. 3, ТГУ, МИСиС (2009), с. 363–406.
3. P.A. Khaimovich, Handbook of Mechanical Nanostructuring, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2015), p. 435–448.
4. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, П.А. Хаймович, в сб.: Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства металлов, Тульский политехнический институт, Тула (1980), с. 72–75.
5. С.Б. Рожкова, А.Л. Осинцева, Металловедение и термическая обработка металлов № 2, 63 (1975).
6. А.В. Мац, П.А. Хаймович, ФТВД **19**, № 1, 69 (2009).

P.A. Khaimovich

## ON THE PRACTICAL APPLICATION OF THE 18Cr10NiTi STEEL AFTER BAROCRYODEFORMATION

Application of the 18Cr10NiTi steel in the course of manufacturing of critical elements of the devices for cryodeformation of metals and measurement of mechanical properties at elevated temperatures is described. An opportunity is given by the use of barocryodeformation (BCD-methods) for the steel hardening. An attention is paid to the construction features of the devices for barocryodeformation and the application technology. The characteristics are determined by the fact that a solid that is sufficiently plastic at cryogenic temperatures is used as a pressure-transmitting medium in the devices.

**Keywords:** plastic deformation, uniform compression, barocryodeformation, cryogenic temperatures, 18Cr10NiTi steel

**Fig. 1.** Annealing temperature dependence of the yield strength of the 18Cr10NiTi steel exposed to BCD on 35% at 300 (1) and 77 K (2). The time of each annealing is 30 min

**Fig. 2.** Capture element of the deformation machine that has lost the shape at 550°C during the compression test of the sample cut from the 18Cr10NiTi steel after BCD and heat aging

**Fig. 3.** BCD unit: 1 – high-pressure container; 2 – billet; 3 – die; 4 – plunger; 5 – sealing washer; 6 – pressure-transmitting medium

**Fig. 4.** The one-piece plunger (a) and the plunger of two elements (b)