

## СКРЫТЫЕ РЕЗЕРВЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Хаймович П.А.

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",  
г. Харьков, Украина. E-mail: [pavel.41@bk.ru](mailto:pavel.41@bk.ru)

Доклад с подобным названием около одиннадцати лет назад был представлен на одной из конференций в Обнинске. К этому времени уже прочно укрепилось убеждение, что преимущественный путь повышения дисперсности структуры металла как предпосылки достижения высоких физико-механических характеристик – это интенсивные пластические деформации (ИПД). Осознание того, что прочностные характеристики металла, достигаемые при его деформировании, неразрывно связаны с концентрацией границ раздела, формируемых при этом деформировании, естественным образом приводило к стремлению добиваться все больших и больших степеней деформации при деформировании, что должно приводить к увеличению насыщенности материала этими границами. Успешность такого подхода подтверждалась рядом работ.

В последующем, однако, стало высказываться мнение, что методы повышения физико-механических свойств металлов, их структурирования путем пластического деформирования на все более высокие степени себя исчерпали. Основания для таких выводов были: совершенствование применяющихся и разработка все новых способов – винтовой ГЭ, многоугольной экструзии и т.д. – показывали, что уровень достигаемого диспергирования структуры входит в насыщение.

Упомянутый выше доклад, содержащий как информацию о выполненных десятками лет ранее работах, так и о современных исследованиях, обращал внимание на те перспективы, которые открываются в случае понижения температуры деформирования в область криогенных температур.

Последующие работы привели к пониманию, что в ряде случаев не столько степень деформации, сколько условия деформирования – температура, уровень сил всестороннего сжатия (при их наличии) – способны обеспечить такую степень диспергирования структуры, которая варьированием величины деформации при комнатной температуре или при нагреве не достигается. Высказанная концепция иллюстрируется схемой, которую условно можно назвать «Миром деформирования» (рис.1).

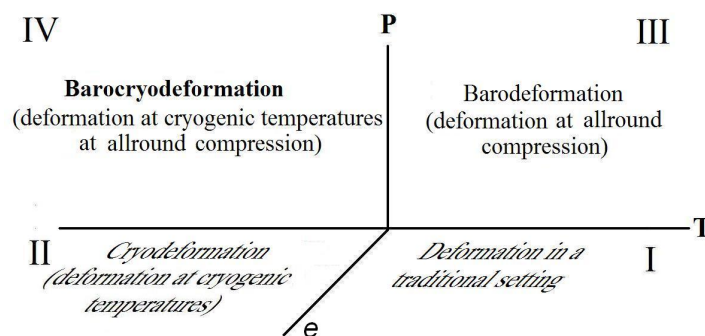


Рисунок 1 - Четыре континента "Мира деформирования" металлов.  $T$  – температура, при которой проводится деформирование,  $e$  – степень деформации,  $P$  - уровень всестороннего сжатия деформируемого объекта [1].

Человечество, веками занимаясь металлообработкой, вплоть до XX-го века ограничивалось только, условно говоря, первым континентом «Мира деформирования». Лишь менее ста лет назад развитие технологий позволило начать осуществление пластического деформирования металлов как в условиях всестороннего сжатия, так и при криогенных температурах, что означало начало освоения «континентов» II и III.

Подавление процессов динамического возврата при понижении температуры деформирования в итоге приводит к дополнительному диспергированию структуры, но применимость *криодеформирования* (рис. 1., область II) ограничивается снижением пластичности металла по мере понижения температуры деформирования.

Деформирование в условиях всестороннего сжатия (область III на рис. 1. – *бародеформирование*) – на практике это те или иные виды гидроэкструзии – сегодня очень распространено, позволяя пластически деформировать низкопластичные металлы и сплавы без существенного нагрева или вообще при комнатной температуре. Но при пониженных и криогенных температурах гидроэкструзию не осуществляли в силу отсутствия жидкостей, способных играть роль передающей давление среды при низких температурах.

Желание совместить преимущества гидроэкструзии и низкотемпературного деформирования наталкивалось на вроде бы неразрешимую проблему: жидких сред, способных передавать усилия при криогенных температурах, не существует. Есть примеры создания квазигидростатического давления при криогенных температурах применением твердых тел, но, как правило, диэлектриков и только в статических условиях.

Тем не менее, в последней четверти прошлого века низкотемпературная квазигидроэкструзия была реализована, удалось начать осваивать «IV континент» (см. рис. 1). С ролью среды, посредством которой оказалось возможным осуществить продавливание металлической заготовки через матрицу при криогенных температурах, удовлетворительно справились парафин, графитовый порошок. Но безусловным лидером в этом качестве оказался индий. Он достаточно пластичен при криогенных температурах, чтобы обеспечить квазигидростатическую передачу давления на выдавливаемую заготовку, и, в то же время, вязкость его такова, что, в отличие от жидкостных устройств высокого давления, не требуется специальных мер для удержания его в камере высокого давления, что, кстати, определяет и безопасность эксплуатации экструзионных устройств, где он используется в качестве передающей давление среды.

Что же нового преподнесло *криодеформирование* – вступление на «четвертый континент»?

Эффекты, наблюдаемые при тех или иных исследованиях, условно можно разделить на три группы: с ожидаемыми результатами, результатами неожиданными, но находящими свое объяснение, и результатами, объяснение которым так и не удается (хотелось бы думать, что временно) найти.

Ожидаемыми результатами было получение высокодисперсной структуры в ряде металлов и сплавов, что приводило к повышенным значениям прочностных характеристик по сравнению с теми, которые можно было достичь при комнатной либо повышенных температурах деформирования. Платой за это, естественно, было снижение пластичности, но этот момент требует дополнительного рассмотрения. Особенности многих металлов и сплавов, претерпевших БКД таковы, что после достижения высоких значений предела текучести в материале практически не наблюдается равномерного удлинения, но и хрупкое разрушение не имеет место. Развивается локальная деформация с образованием шейки, причем поперечное сужение до момента разрушения достигает больших значений, вплоть до 80-90%. В целом это положительный результат, так как в большинстве случаев конструкторов интересует именно характеристики металла до начала его пластической деформации. Поведение при нагревах после БКД однофазных «модельных» металлов, таких, как медь, никель, поликристаллических в исходном состоянии, предсказуемо: чем ниже температура при БКД, тем раньше в них идут процессы возврата и рекристаллизации. Иная картина в том случае, если барокриодеформированию подвергаются монокристаллы этих металлов. Деформирование при криогенных температурах в условиях всестороннего сжатия, что имеет место при БКД, позволяет металлу в значительной мере сохранить регулярность структуры, монокристалльность, что

определяет необходимость нагрева до значительно более высоких температур для начала протекания процессов возврата и рекристаллизации, чем в случае деформирования этих объектов при комнатной и повышенных температурах. То есть снижение температуры деформирования приводит к повышению температуры возвратных процессов.

Достижение улучшенных характеристик при повышенных температурах конструкционных материалов, подвергнутых БКД, имеет разные причины. Так, предел текучести сплава PE16, применяемого для турбин, при рабочей температуре 750°C удается повысить почти в полтора раза, но объясняется это скорее стабилизирующими свойствами за счет имеющих место в исходном состоянии микровкраплений, тормозящих возвратные процессы в сильнодеформированном при БКД материале.

Получение высокопрочного состояния при повышенных температурах такого материала как сталь X18H10T (1,6-1,7 ГПа при 500°C) имеет другое объяснение. При БКД этой стали, аустенитной в исходном состоянии, достигается практически полный мартенситный переход. Состаривание этого мартенсита в оптимальной температурной области приводит к дополнительному росту механических свойств материала с образованием структуры, устойчивой к нагревам.

В группе результатов неожиданных стоит упомянуть то, что при БКД аустенитной в исходном состоянии стали X18H10T после относительно невысоких деформаций (25-30%) наблюдается практически полный переход аустенита в мартенсит, хотя, как известно, плотность мартенсита ниже, чем аустенита, и энергетически такой переход при всестороннем сжатии, что имеет место при БКД, невыгоден. Объяснение этому факту было найдено в обнаруженной двустадийности мартенситного перехода, что потребовало применения так называемого общего случая БКД, при котором экструдирование заготовки осуществляется за счет разницы давлений в рабочей камере и камере противодействия.

Вообще говоря, общий случай БКД приходится использовать при деформировании низкопластичных металлов и сплавов, таких, как гафний и хром, никелид титана и пальцевая сталь, чтобы обеспечить возможность пластического их деформирования при низких температурах. Но неожиданным (и еще не объясненным) оказался результат на стали X18H10T, хорошо деформируемой и при частном случае БКД (без приложения противодействия). Осуществление общего случая БКД на этой стали на 10-15% привело к практически полному мартенситному переходу, причем предел текучести после оптимальных термообработок составил 2,4-2,5 ГПа, чего ни при каких других видах воздействия на этой стали достичь не удавалось.

Свойства металлов, деформированных в экстремальных условиях криогенных температур и всестороннего сжатия, в настоящее время изучают в ряде исследовательских коллективов, но реализация этого воздействия вплоть до настоящего времени осуществляется только в ИФТТМТ ННЦ «Харьковский физико-технический институт». В книге о харьковских физиках, вышедшей несколько лет назад, низкотемпературное квазигидроэкструдирование металлов и сплавов названо «технологией XXI века», поэтому представляется желательным и вероятным, что появятся новые центры по развитию этого прогрессивного метода воздействия на металлы и сплавы.

#### Литература.

1. Khaimovich, P. A. Metal Nanostructuring through Cryodeformation under All-Round Compression, in Handbook of Mechanical Nanostructuring (ed M. Aliofkhaezrai), Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany (2015).