

УДК 539.38:539.4.539.61

В. М. Мацевитый, д-р техн. наук**К. В. Вакуленко**, канд. техн. наук**И. Б. Казак**, канд. техн. наукИнститут проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua)

О ЗАЛЕЧИВАНИИ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

Проанализированы наиболее важные аспекты процесса заличивания дефектов металла при пластической деформации. Предложено объяснение заличивания несплошностей в металле с привлечением современных представлений об адгезии твердых тел.

Проаналізовано найважливіші аспекти процесу заліковування дефектів металу при пластичній деформації. Запропоновано пояснення заліковування несуцільностей в металі із залученням сучасних уявлень про адгезію твердих тіл.

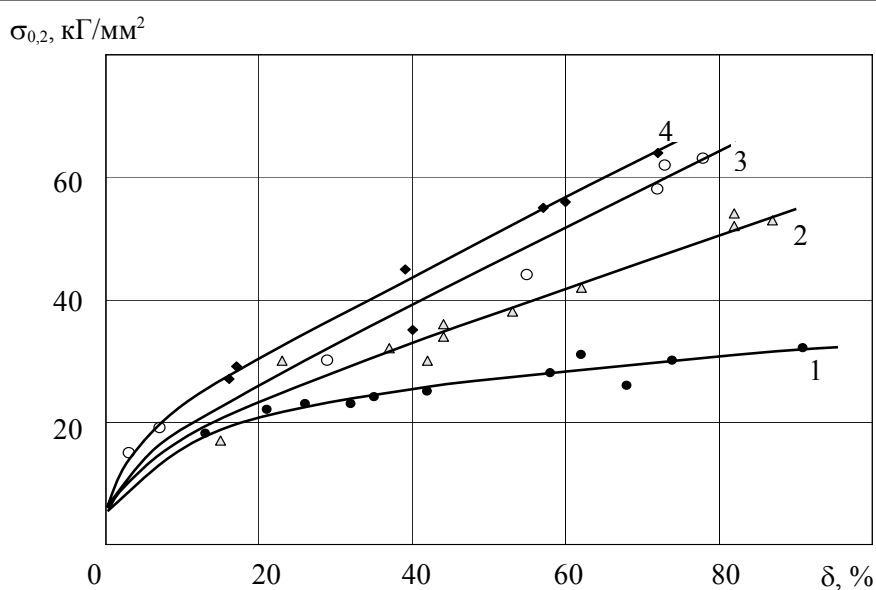
Под заличиванием дефектов подразумевают всю совокупность физических процессов, приводящих к уменьшению концентрации дефектов в металлах. Для протекания большей части этих процессов нужна термическая активация, а скорость протекания их непосредственно связана с тепловой подвижностью отдельных атомов, либо с «кооперативным смещением ансамблей атомов на расстояния, малые по сравнению с межатомным» [1].

Такой подход к заличиванию охватывает практически все процессы, происходящие в металле с уменьшением его свободной энергии: отдых (рекомбинация междоузельных атомов и вакансий, диффузионное перемещение точечных дефектов к стокам и их исчезновение, образование скоплений точечных дефектов, рекомбинация дислокаций противоположных знаков), полигонизацию (формирование субзерен, их рост, разворот), рекристаллизацию (первичная, собирательная, вторичная), заличивание объемных дефектов (поры, трещины, рост и коагуляция дисперсных частиц).

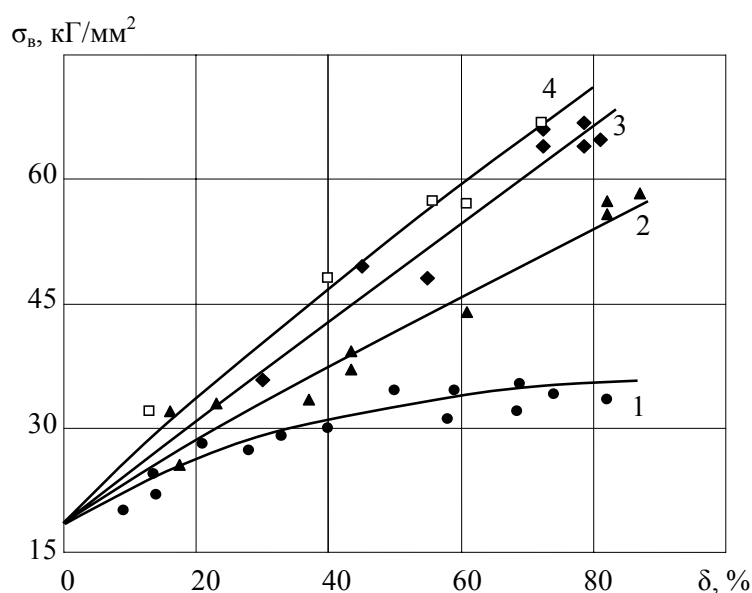
Из всей совокупности этих процессов мы остановимся лишь на тех, которые протекают непосредственно при пластической деформации, поскольку они играют значительную роль в структурообразовании деформированного металла и существенно влияют на его прочность и долговечность. Речь идет о динамическом заличивании дефектов при деформации и, прежде всего, – о динамическом отдыхе (или возврате), хотя в работе [1] выделяют также динамическую полигонизацию и динамическую рекристаллизацию.

Иногда полагают, что в ходе пластической деформации металлы только упрочняются, а разупрочнение протекает лишь при последующем нагреве. На самом деле процесс пластической деформации значительно сложнее: одновременно идет образование дефектов и их аннигиляция, и поэтому одновременно происходит упрочнение и разупрочнение. Более того, одновременно протекает с той или иной скоростью и разрушение, которое состоит в постепенном накоплении разрывов межатомных связей и образовании сначала субмикротрещин, потом микротрещин, а затем и макротрещин, приводящих к макроразрушению металла.

Понятие о динамическом возврате было введено достаточно давно для объяснения перехода от линейного упрочнения ГЦК-кристаллов на второй стадии деформации к менее интенсивному упрочнению на третьей стадии [2], что связывалось с усилением поперечного скольжения. В поликристалле, когда зерна по отношению к внешней нагрузке ориентированы неодинаково, пластическая деформация в разных зернах проходит в любой момент времени разные стадии деформации, в связи с чем можно говорить, что на ход кривой «напряжение – деформация» с самого начала определенное влияние оказывает поперечное сколь-



а)

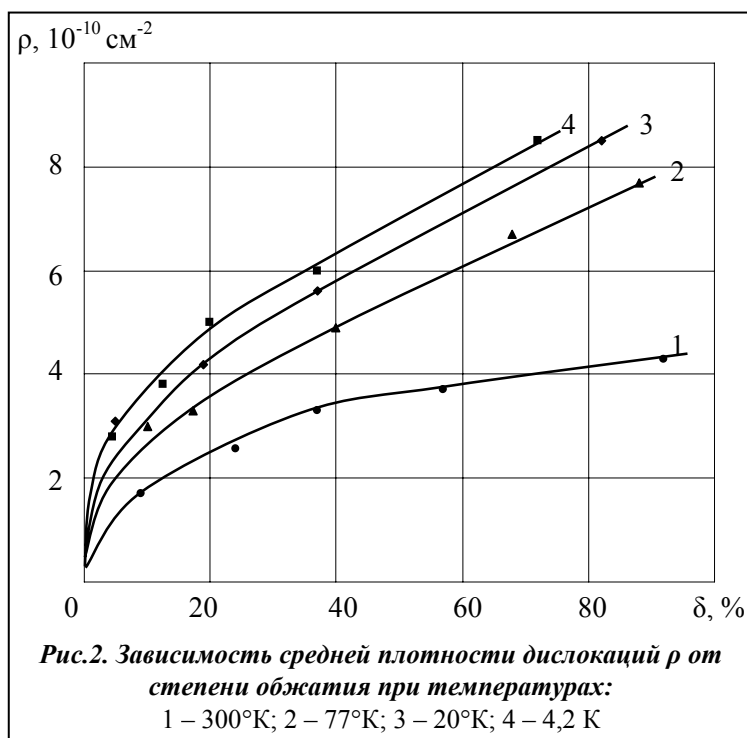


б)

Рис. 1. Зависимость пределов текучести (а) и прочности (б) меди от степени прокатки при температурах: 1 – 300°K; 2 – 77°K; 3 – 20°K; 4 – 4,2°K

жение (даже в том случае, когда деформация осуществляется при весьма низких температурах). Именно с этим связана, например, различная степень упрочнения поликристаллической меди, прокатанной с разными обжатиями при комнатной температуре, 77, 20 и 4,2 К (рис. 1) [3]. Температура деформации в данном случае определяет интенсивность поперечного скольжения и влияет не только на прочность металла, но и на его дефектность. На рис. 2 представлены значения средней плотности дислокаций в меди после разных по величине деформаций при указанных температурах (определялась она на основе измерений удельного электросопротивления металла после отогрева его до комнатной температуры).

Детальное исследование динамического отдыха на структурном уровне стало возможным в результате применения метода меченых атомов. Было подтверждено предполо-



формирования достигает $10\text{--}10^2\text{ с}^{-1}$ скорость переноса меченых атомов в твердой фазе превышает диффузионную подвижность атомов на несколько порядков. До конца этот эффект до сих пор не объяснен, хотя авторами [1] и высказываются предположения о междоузельном механизме этого процесса.

К динамическому отдыху следует отнести также аннигиляцию дислокаций противоположных знаков в ходе пластической деформации при повышенных температурах.

Интересен пример динамического отдыха, описанный в работе [8]. При прокатке поликристаллической бескислородной меди при комнатной температуре было установлено, что при некоторой структуре исходного отожженного металла нельзя получить прочность выше $\sigma_v = 400\text{ МПа}$, поскольку, начиная с 60% обжатия прочность металла изменяется уже незначительно, т. е. имеет место случай, когда скорости наклепа и динамического отдыха сравнялись и природа самого металла не позволяет при данной температуре осуществить более серьезное упрочнение. Однако если прокатать этот металл в отожженном состоянии при более низкой температуре (например, при 20 К) с таким обжатием, что его прочность будет превышать указанный предел, а затем дополнительно деформировать его прокаткой при комнатной температуре, то прочность металла с увеличением степени обжатия при дополнительной прокатке будет постепенно уменьшаться (рис. 3). По-видимому, предварительное деформирование прокаткой при 20 К создало структуру, которая при последующей докатке при комнатной температуре оказалась неустойчивой, что и привело к превышению скорости динамического отдыха и разупрочнению металла, т. е. в данном случае пластическая деформация докаткой при комнатной температуре приводит не к упрочнению и не к увеличению концентрации дефектов, а наоборот, к уменьшению их концентрации (т. е. к залечиванию) и разупрочнению.

В работе [1] рассмотрено влияние на залечивание дефектов гидростатического давления, которое, как считают авторы, не всегда однозначно, поскольку оно, с одной стороны, увеличивает термодинамический стимул залечивания дефектов, но с другой – уменьшает их термическую подвижность. Высокое гидростатическое давление замедляет перемещение вакансий к стокам и практически не влияет на скорость миграции междоузельных атомов. Кроме того, рост давления снижает равновесную концентрацию вакансий.

жение об ускорении диффузионных процессов за счет упругих микронапряжений в кристаллах. Удалось получить доказательства ускорения диффузии вдоль дислокаций. В работах [4, 5] описаны исследования, в которых установлено линейное увеличение эффективного коэффициента объемной диффузии с ростом скорости деформации. Эти результаты легко объяснялись на основе представлений об увеличении концентрации избыточных вакансий, образование которых связано с движением дислокаций.

Но вскоре в работах [6, 7] был обнаружен аномальный массоперенос (АМП): оказалось, что при импульсном нагружении, когда скорость де-

Равновесная ширина расщепленных дислокаций увеличивается в гидростатически сжатых непереходных ГЦК-металлах, что затрудняет поперечное скольжение винтовых компонент и переползание краевых компонент дислокаций. Поэтому полигонизация под давлением происходит с меньшей скоростью и приводит к образованию менее совершенной полигональной структуры: наблюдаются широкие субграницы, состоящие из сложных объемных дислокационных сплетений [1].

При гидростатическом давлении замедляется образование центров рекристаллизации, замедляется и собирательная рекристаллизация. В то же время поры при гидростатическом давлении залечиваются быстрее.

Наибольший интерес представляют исследования структуры и свойств металлов, деформирование которых происходит при высоких постоянно действующих гидростатических давлениях.

Начало исследованиям в этой области было положено известным американским ученым П. Бриджменом, работы которого далее были развиты советской школой физиков во главе с Л. В. Верещагиным; одновременно этими же вопросами занимались в Австралии, Франции, США [9].

Интерес к данным исследованиям обусловлен тем обстоятельством, что, как оказалось, пластичность металлов повышается при наложении на схему напряженного состояния дополнительных сжимающих напряжений. При этом, чем больше сжимающие напряжения, тем большую пластическую деформацию может претерпеть материал без разрушения [9].

Эксперименты под давлением проводят, как правило, на растяжение в специальной камере, в которой предварительно создается гидростатическое давление, после чего к образцу прикладывается растягивающее усилие.

На разных металлах П. Бриджмен установил, что предельная пластичность металлов (максимальное поперечное сужение при растяжении до разрыва) прямо пропорциональна гидростатическому давлению P

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \kappa P,$$

где ε – максимальное поперечное сужение при растяжении до разрыва под гидростатическим давлением; ε_0 – максимальное поперечное сужение при растяжении без гидростатического давления; κ – коэффициент пропорциональности.

При этом $\varepsilon = \ln(S_0/S_p)$, где S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца; S_p – площадь сечения шейки образца в момент разрыва.

В работе [9] и других исследованиях Б. И. Бересневым с сотрудниками было также обнаружено, что в условиях гидростатического давления выше определенного порога некоторые весьма хрупкие металлы приобретают пластичность и растягиваются с образованием шейки. В работе [9] была описана обобщенная зависимость предельной пластичности при растяжении металлов при высоких давлениях, которая изображена на рис. 4.

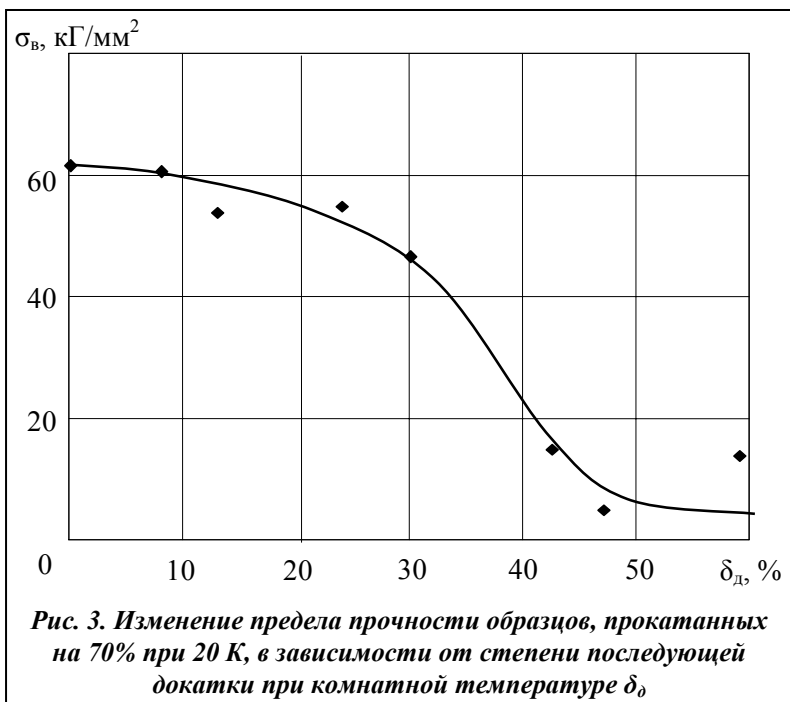
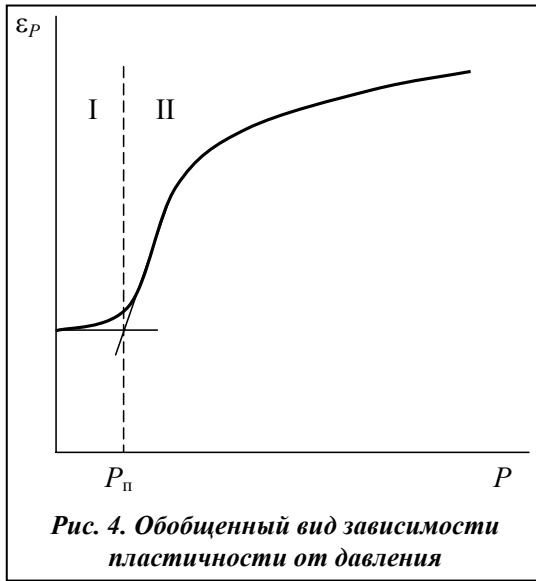


Рис. 3. Изменение предела прочности образцов, прокатанных на 70% при 20 К, в зависимости от степени последующей докатки при комнатной температуре δ_d



Кривая этой зависимости состоит из двух участков:

участка I (при $P < P_{II}$), где $\frac{\partial \epsilon}{\partial P} \approx 0$ и

участка II (при $P > P_{II}$), где $\frac{\partial \epsilon}{\partial P} > 0$.

При этом величина P_{II} , названная «пороговым давлением», для хрупких металлов

$$P_{II} = \frac{Q}{S} - \left(\frac{2E\beta}{\pi l} \right)^{\frac{1}{2}},$$

а для пластичных металлов, которые и при атмосферном давлении разрушаются с образованием шейки

$$P_{II} = \sigma_i \left(1 + \frac{r}{2R} \right) - \left(\frac{2E\beta}{\pi l} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где Q – растягивающее усилие; S – площадь поперечного сечения; $\left(\frac{2E\beta}{\pi l} \right)^{\frac{1}{2}}$ – критические

напряжения, необходимые для распространения трещин разрушения по теории Гриффитса-Орвана; σ_i – интенсивность напряжений в наименьшем сечении шейки образца; R – радиус кривизны шейки; r – радиус наименьшего поперечного сечения шейки; E – модуль упругости; β – эффективная поверхностная энергия; $2l$ – размер трещин.

Авторам удалось найти P_{II} для большинства изученных материалов (см. табл. 1) [9].

На основе теоретического анализа авторы приходят к выводу, что гидростатическое давление не влияет на зарождение трещин, но замедляет развитие разрушений на последней стадии, когда сформировавшиеся трещины уже распространяются.

Таблица 1. Пороговые давления для ряда металлов

Материал	P_{II} , кг/см ²	Материал	P_{II} , кг/см ²
хром	~3000	сталь (0,84 % С)	1400
молибден		медь М2	1200
М4(рекристаллизованный)	2000	латунь Л-68	~200
МС(рекристаллизованный)	2200	латунь ЛС-59-1	~700
вольфрам		дюралюминий Д16	
литой	7500	отожженный	~500
металлокерамический	7000	закаленный	~2000
α -железо (отжиг 840 °С)	~600	магний	
		литой	1400
		гомогенизированный	800
сталь (0,46 % С)		титановые сплавы	
отожженная 800 °С	1900	BT1-1	~1000
улучшенная	1300	BT5-1	~4000

При рассмотрении вопроса о возможности залечивания трещин под воздействием деформации в условиях гидростатического давления авторы приходят к выводу, что хотя оценки, проводимые методами механики сплошной среды, свидетельствуют о невозможности такого залечивания, на самом деле такое залечивание, безусловно, имеет место, о чем свидетельствуют конкретные эксперименты, в которых деформации под гидростатическим

давлением подвергаются металлы с заранее созданными порами и субмикротрещинами. Залечивание наблюдается как на микрошлифах, так и по возрастанию прочности и пластичности дефектного материала в результате деформации под давлением. При этом важно подчеркнуть, что залечивание происходит при величине сжимающих напряжений несущественно более высоких по сравнению с пределом текучести материала.

Механизм залечивания авторы объясняют следующим образом: внешнее давление, подавляя силы, стремящиеся раскрыть трещину, не позволяет этой трещине разрастаться и создает возможность образования все большего числа контактных мостиков между противоположающимися выступами. В точках контакта вследствие высоких контактных напряжений и взаимного проскальзывания металла происходит восстановление несплошностей, аналогичное так называемой холодной сварке. При этом не исключена возможность того, что за счет пластической деформации, а также за счет высвобождения поверхностной энергии в точках, соответствующих восстановленным связям, происходит локальный нагрев металла, способствующий активизации диффузионных процессов.

Позднее авторы несколько изменяют свои представления о механизме залечивания: они считают, что при достаточно высоких давлениях имеет место не только подавление развития трещин разрушения, но и подавление их зарождения.

Таким образом, речь идет как о залечивании имеющихся трещин, так и о подавлении зарождения новых.

С помощью электронной микроскопии авторам удалось открыть явление «барополигонизации», под которым понимается образование при деформации под высоким гидростатическим давлением исключительно мелких (2–3 мкм) ячеек с сильной разориентацией (8–12°), т. е. образовавшиеся ячейки (или полигоны), по существу, являются границами зерен. При этом средняя плотность дислокаций уменьшается, а оставшиеся дислокации формируют границы ячеек.

Аналогичные результаты получены авторами [9] также на ряде хрупких соединений, в которых преобладают не металлические, а ковалентные или ионные связи (Al_3Mg_4 , $PbTe$, V_3Si , LaB_6 , эвтектидный сплав $Co_2Si + CoSi$, VGa , $ZrBe_{13}$). В этой работе также отмечается ускорение ползучести твердых тел при высоких давлениях. Авторы считают, что, начиная с некоторой величины давления, характерной для каждого материала, ползучесть ускоряется, причем параметр давления влияет на ползучесть подобно температуре, т. е. является фактором, способствующим активации процессов разупрочнения.

В работе [9] описаны также исследования влияния предварительной деформации под высоким давлением на остаточные свойства различных металлов и сплавов. При этом обнаружено значительное улучшение физико-механических свойств материалов. Важно подчеркнуть, что это улучшение касается одновременного значительного повышения и прочности, и пластичности. Эти результаты способствовали интенсивным исследованиям в области упрочнения материалов методами гидроэкструзии и комбинированных схем деформирования при высоких давлениях.

Анализ изложенных выше представлений, касающихся динамического возврата, показывает, что по формальным признакам наблюдаемое явление барополигонизации может быть отнесено к динамическому возврату, т. е. к возврату при деформации. С другой стороны, можно говорить о том, что этот вид динамического возврата имеет существенную особенность. Он проходит в условиях всестороннего сжатия, т. е. тогда, когда существует термодинамическая целесообразность уплотнения массы металла путем ухода из него дефектов кристаллического строения. Гидростатическое давление, приложенное к металлу, не сопровождается пластической деформацией, также обеспечивает термодинамическую целесообразность уплотнения материала, однако эта возможность не реализуется из-за малой подвижности дефектов. При барополигонизации появляется возможность залечивания дефектов из-за возбуждающего влияния на состояние кристаллической решетки металла дополнительной деформации. При постоянно протекаемой деформации все время происходит генерация точечных дефектов (а значит, и массоперенос), что приводит к возрастанию их кон-

центрации и ускорению процессов поперечного скольжения и переползания. Возможно также локальное повышение температуры в микрообъемах, где осуществляется деформация, что повышает подвижность дефектов, ускоряется аннигиляция дислокаций противоположных знаков, а дислокации одного знака быстрее выстраиваются в стенки полигонов. В этом процессе деформация является причиной перемешивания металла и «выметания» дефектов из гидростатически нагруженного объема, что по существу и является причиной повышения термодинамической стабильности металла, повышения его пластичности и даже повышения прочности за счет формирования большеугловых границ полигонов. Последнее обеспечивает увеличение сопротивления движению дислокаций при нагружении металла после барополигонизации.

Следует подчеркнуть также, что условия пластической деформации в гидростатически нагруженном объеме с точки зрения схватывания металлов являются идеальными [10–13]. Поэтому процесс залечивания несплошностей при барополигонизации, безусловно, один из важнейших факторов формирования полигональной и прочной структуры. На наш взгляд, этот эффект еще недостаточно понят специалистами в области обработки металлов и поэтому не нашел еще адекватного промышленного применения.

Что общего и в чем различие между явлением барополигонизации и явлением аномального массопереноса (АМП)? Оба явления сопровождаются значительным ускорением перемещения атомов, оба явления проявляются при пластической деформации: барополигонизация при низких скоростях деформации в условиях постоянного всестороннего сжатия, а АМП – при импульсных (ударных) нагрузках, когда деформация имеет высокую скорость $\dot{\epsilon} = 10\text{--}10^2 \text{ с}^{-1}$ и когда в процессе импульсного нагружения возникают весьма кратковременные, но очень высокие напряжения сжатия.

Итак, общее: высокие давления, пластические деформации и результат – высокая подвижность атомов.

Различие: при барополигонизации – постоянно действующее всестороннее сжатие, соответственно малые скорости деформации и существенное изменение микроструктуры в результате; при АМП – импульсное очень кратковременное давление, высокие скорости деформации и малозаметные изменения микроструктуры в результате, но хорошо фиксируемое аномально высокое перемещение отдельных атомов. Схожесть эффектов позволяет предположить, что в основе обоих явлений лежат одни и те же физические причины (или один и тот же механизм).

Высокая интенсивность его протекания, но очень малая продолжительность при АМП не позволяет существенно изменить микроструктуру металла, но позволяет фиксировать отдельные очень большие атомные перемещения. С другой стороны, при барополигонизации малая интенсивность, но высокая продолжительность процесса не позволяет получить очень большие атомные перемещения, но существенно изменяет микроструктуру металла.

Следует сказать, что многолетняя дискуссия о возможном механизме АМП не привела к выяснению истинной причины «сверхскоростного» переноса в твердом теле в условиях сильных динамических воздействий на металл путем взрывного или иного импульсного ударного нагружения [6, 14, 15]. Отметим несколько новых интересных подходов к объяснению явления АМП, не анализируя их достоинства и недостатки.

В работе [16], говоря об АМП, авторы подчеркивают, что этот эффект сопровождается в случае проводников и диэлектриков резким изменением проводимости, сильным увеличением скорости химических реакций, что свидетельствует о формировании «сильновозбужденных состояний».

В работах [17, 18] было показано, что указанные аномалии связаны с возникновением смеси двух квантово-механических состояний: основных и сильно возбужденных. Анализ последствий сильного взаимодействия электронной и решеточной подсистем твердого тела при больших давлениях (например, в зоне концентрации напряжений) и деформациях показывает, что вполне вероятен процесс радикального изменения потенциального рельефа

твердого тела, т. е. по существу речь идет о существенном изменении его межатомных связей [16]. Сильно возбужденные состояния, по мнению авторов, возникают в зонах сильной локализации деформации. Одним из проявлений таких состояний может быть образование квазижидкой фазы по границам зерен, что проявляется при определенных условиях как сверхпластичность. По-видимому, подобным же образом в некоторых объемах может произойти полное разрушение межатомных связей, что приводит к увеличению массопереноса, совершенно не свойственного диффузии.

Интересное объяснение указанному явлению предложено в работе [14]. Авторы считают, что АМП в указанных условиях объясняется диффузией, для которой характерна существенно сниженная энергия активации. Главным фактором, понижающим энергию активации при механическом воздействии на металл, является сильная неравновесная упругая деформация металла (сжатие – в одном направлении и растяжение – в других направлениях). Растяжение уменьшает энергию межатомной связи, т.е. снижает потенциальный барьер для элементарного акта диффузии. Импульсный характер механического нагружения авторы считают важным, но второстепенным фактором, который лишь увеличивает упругую деформацию. Это увеличение объясняется тем, что за малое время действия ударного импульса не успевает начаться активная пластическая деформация, диссипирующая приложенное возбуждение (по этой причине предел упругости увеличивается со скоростью деформации). По мнению авторов, эффект ускоренного массопереноса по этой же причине должен увеличиваться с повышением прочности металла матрицы, например, при переходе от отоженной к упрочненной стали и при снижении температуры процесса.

Таким образом, в рассматриваемой объемно-энергетической модели влияния механической деформации на диффузионный массоперенос важной является величина возможной упругой деформации твердого тела, которая, естественно, прямо связана с его прочностью: $\sigma_{0,2} = \varepsilon_{0,2}E$ где $\varepsilon_{0,2}$ – упругая деформация на условном пределе текучести $\sigma_{0,2}$. Поэтому чем прочнее металл, тем больший эффект в ускорении массопереноса можно ожидать.

Таким образом, физика АМП связана, по мнению авторов, с тем, что механическая активация диффузии реализуется значительно легче, чем температурная. Механическое воздействие облегчает диффузию из-за понижения уровня потенциального барьера для элементарного акта диффузии. Эффект увеличения межатомного расстояния при механическом нагружении можно охарактеризовать с помощью эквивалентной температуры T_3 или эквивалента q_3 механической деформации ε_m

$$q_3 = 3RT_3 = 2(1 - 2\nu) \varepsilon_m Q_c,$$

где Q_c – теплота сублимации.

Эквивалент q_3 означает ту тепловую энергию, которая создает такое же понижение потенциального барьера для диффузии, что и упругая деформация решетки ε_m .

Тепловой эквивалент q_3 возрастает с увеличением ε_m и при достижении предельной величины $\varepsilon_{пр} = (1 - 2\nu)^{-1}$ равен $2Q_c$, что для потенциальной энергии соответствует равенству Q_c .

Из этого следует, что при очень больших упругих деформациях энергетическое состояние твердого тела приближается к предельному, сопоставимому с газообразным состоянием. Именно поэтому диффузионная подвижность атомов при большой упругой деформации резко увеличивается.

В подтверждение своих соображений авторы вспоминают эксперименты П. Бриджмена [19], в которых тротил в условиях всестороннего статического сжатия не взрывался даже при давлении 5 ГПа. Они считают, что взрыв возможен лишь при динамическом и одностороннем нагружении. В этом случае деформация сжатия вещества в осевом направлении вызывает его расширение в поперечном, где происходит увеличение межплоскостных расстояний, уменьшение сил связи до полного их разрыва. Расширение области разрушения

связей и быстрый отвод энергии разрушенных межатомных связей в окружающее пространство, по мнению авторов, вызывает взрыв^{*}).

Мы предлагаем несколько иное объяснение явления АМП и явления барополигонизации. Отметим, что повышение подвижности атомов в обоих случаях является фактором, способствующим залечиванию дефектов кристаллического строения, т.е. уменьшению их концентрации, особенно в зонах высоких внутренних перенапряжений, где сосредоточены как дислокационные скопления, так и субмикротрещины (образовавшиеся на самых начальных стадиях накопления несплошностей или разрушений межатомных связей, которые еще не привели к существенной релаксации внутренних напряжений). Повышение подвижности атомов способствует и такому (казалось бы далекому от рассматриваемых вопросов) явлению, как схватывание металлов, которое возникает при совместном деформировании двух металлов. Схватывание в данном случае обусловлено дополнительной деформационной активацией поверхностных атомов (дополнительной по отношению к обычной температурной активации) двух тел, которые приобретают такие амплитуды колебаний, что происходит перекрытие валентных орбиталей поверхностных атомов двух тел и образование по этой причине межатомных связей. Этот механизм лежит в основе всех технологий по холодной сварке металлов.

Важно отметить, что химическая адгезия не предполагает участия в процессе схватывания двух тел диффузии, хотя при определенных условиях после химической адгезии может идти и диффузия, которая повышает прочность «сварного» шва. По-видимому, это имеет место и при сварке взрывом.

Нет причины сомневаться в том, что подобный процесс может происходить в пределах одного металла, имеющего несплошности в виде субмикротрещин. Тогда происходит внутренняя адгезия (внутреннее схватывание) с залечиванием субмикротрещин. Один из основоположников современной теории химической адгезии А. П. Семенов [20] обращал внимание на то, что процесс схватывания может носить лавинообразный (самораспространяющийся) характер, когда за счет энергии, выделяющейся в течение определенного времени в некотором объеме в результате спонтанной адгезии, процесс может быстро распространяться на смежные области и протекать во все большем объеме металла.

Нам представляется, что подобный механизм действует и в случае барополигонизации. Гидростатическое давление способствует сближению атомов, лежащих на разных берегах субмикротрещин, что увеличивает вероятность перекрытия валентных орбиталей атомов и ускоряет процесс. В силу постоянного гидростатического давления и медленной (управляемой) деформации этот механизм залечивания можно назвать управляемым.

При импульсном механическом воздействии на металл (удар, взрыв и т. п.), когда имеет место АМП, деформация происходит быстро и кратковременно, поэтому несмотря на то, что единичный импульс приходится на небольшой объем металла, он может быть инициатором лавинообразного процесса распространения химической адгезии на смежные объемы. Поэтому залечивание происходит в большем объеме твердого тела, а в некоторых микрообъемах возможен даже разрыв всех связей и возникновение по этой причине аномального массопереноса. В связи с тем, что процесс этот идет очень кратковременно, существенных микроструктурных изменений после охлаждения металла не наблюдается, ибо для формирования новой структуры нужно время. Известную аналогию можно увидеть при формировании микроструктуры в результате импульсной лазерной обработки металла: старые границы зерен остаются на месте, хотя может несколько изменяться травимость шлифа при использовании конкретного травителя (образование так называемого «белого слоя»). В силу кратковременности процесса импульсного нагружения и невозможности существенного влияния по этой причине на микроструктуру металла его можно назвать неуправляемым (или слабоуправляемым). Одной из существующих возможностей управления этим процес-

^{*}) Разрыв межатомных связей, на наш взгляд, должен вызывать не выделение энергии, а ее поглощение, поскольку создается новая поверхность, на образование которой должна быть затрачена работа.

сом является подбор оптимальной энергии импульсного воздействия на металл и переход от единичного импульса к многократному (с некоторой частотой, которая также потребует оптимизации). В этом случае можно надеяться на эффективное и управляемое залечивание дефектов и формирование упрочненного структурного состояния с повышенной пластичностью. Здесь следует отметить, что подобные устройства в последнее время уже используются в приложении к сварке для улучшения свойств слоя, лежащего между металлом шва и зоной термического влияния свариваемого металла (например, [21, 22]). Эту технологию называют импульсной (или ультразвуковой) проковкой.

На наш взгляд, подобную технологию можно применять для залечивания дефектов изделий, бывших в эксплуатации и нуждающихся в снижении уровня деградации металла с целью продления их ресурса.

В заключение отметим, что к выводу о возможности нарушения межатомных связей металлов при сильных импульсных воздействиях механического характера на металл можно придти также, исходя из термофлуктуационной теории прочности и пластичности [23]. В соответствии с этой теорией скорость пластической деформации $\dot{\epsilon}$ связана с энергией сублимации Q и внешним растягивающим напряжением

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \frac{1}{\exp\left(\frac{Q - \gamma\sigma}{kT}\right)},$$

где $\dot{\epsilon}_0$ – постоянная, равная 10^{13} ; γ – коэффициент, отражающий структурный фактор металла; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Справедливость этого уравнения доказана экспериментально (для широкого диапазона температур и напряжений). Его анализ показывает, что при очень высоких значениях $\dot{\epsilon}$, реализующихся при импульсном нагружении образца, $Q - \gamma\sigma$ стремится к нулю при любой температуре. Для реализации этого условия необходимо обеспечить очень высокое растягивающее напряжение, что при импульсном нагружении прочных сталей возможно. Физически это означает разрушение межатомных связей в результате только импульсного механического нагружения.

Литература

1. Лариков Л. Н. Залечивание дефектов в металлах / Л. Н. Лариков. – Киев: Наук. думка, 1980. – 280 с.
2. Физическое металловедение / Под ред. Р. Кана: в 3-х т. Т.3. Дефекты кристаллического строения. Механические свойства металлов и сплавов. – М.: Мир, 1968. – 484 с.
3. О структуре и механических свойствах меди, прокатанной при 4,2-300 К / И. А. Гиндин, М. Б. Лазарева, В. П. Лебедев и др. // Физика металлов и металловедение. – 1967. – Т. 24, вып. 2. – С. 347–353.
4. Дамаск А. Точечные дефекты / А. Дамаск, Дж. Динс. – М.: Мир, 1966. – 286 с.
5. Герцрикен С. Д. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе / С. Д. Герцрикен, И. Я. Дехтяр. – М.: Физматгиз, 1960. – 38 с.
6. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов / Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, В. Ф. Мазанко и др. // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 221, № 5. – С. 1073–1075.
7. Лариков Л. Н. Прискорення самодифузії у кобальті та нікелі при пластичній деформації / Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, В. Ф. Мазанко // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1975. – № 2. – С. 156–169.
8. Гиндин И. А. Влияние температуры прокатки на структуру и свойства поликристаллической меди / И. А. Гиндин, В. М. Мацевитый, Я. Д. Стародубов // Физика металлов и металловедение. – 1970. – Т. 30, вып. 5. – С. 986–990.
9. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях / Б. И. Береснев, Е. Д. Мартынов, К. П. Родионов и др. – М.: Наука, 1969. – 161 с.
10. Мацевитый В. М. О важности ионной составляющей межатомной связи в обеспечении низкой адгезионной активности инструментальных материалов и покрытий для режущих инструментов при

- высоких температурах резания / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко // Пробл. машиностроения. – 2005. – Т. 8, № 2. – С. 87–90.
11. *Мацевитый В. М.* Анализ адгезионной активности тугоплавких соединений на основе *sp*-элементов по отношению к железу и никелю при высоких температурах / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко // Вісн. Інженер. академії України. – Київ: Київ. політехн. ін-т. – 2005. – № 2. – С. 14–19.
 12. *Мацевитый В. М.* Анализ адгезионной активности тугоплавких соединений на основе *d*-переходных металлов и *sp*-элементов при высоких температурах / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко // Доп. НАН України. – 2006. – № 7. – С. 73–78.
 13. *Мацевитый В. М.* О природе низкой адгезионной активности тугоплавких нитридов и оксидов *d*-переходных металлов / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сб. докл. 7 междунар. конф., 2006 г. – Харьков. – 2006. – Т. 3. – С. 36–39.
 14. *Котречко С. А.* Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков. – Київ: Наук. думка, 2008. – 295 с.
 15. *Массоперенос* в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий / Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко, В. М. Тышкевич, В. М. Фальченко // Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины. – Київ: Ин-т металлофизики, 2001. – 444 с.
 16. *Кооперативные* деформационные процессы и локализация деформации / В. А. Лихачев, В. Е. Панин, Е. Э. Засимчук и др. – Київ.: Наук. думка, 1989. – 320 с.
 17. *Олемской А. И.* Смешанные состояния и физическая механика дефектов в сильно возбужденных кристаллах / А. И. Олемской, В. Е. Панин, В. А. Петрунин // Изв. вузов. Физика. – 1986. – № 2. – С. 20–27.
 18. *Олемской А. И.* О природе конвективного состояния кристаллов в условиях «сверхвысокое давление + сдвиг» / А. И. Олемской, И. И. Наумов, В. Е. Панин // Изв. вузов. Физика. – 1986. – № 6. – С. 34–40.
 19. *Бриджмен П. В.* Новейшие работы в области высоких давлений / П. В. Бриджмен // Усп. физ. наук. – 1947. – Т. 31, № 2. – С. 210–263.
 20. *Семенов А. П.* Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах / А. П. Семенов. – М.: Наука, 1972. – 160 с.
 21. *Кныш В. В.* Повышение ресурса металлоконструкций из низколегированных сталей высокочастотной механической проковкой после ремонтной сварки / В. В. Кныш, В. С. Ковальчук // Автомат. сварка. – 2007. – № 11. – С. 39–42.
 22. *Кныш В. В.* Накопление усталостных повреждений тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном высокочастотной механической проковкой состояниях / В. В. Кныш, С. А. Соловей, А. З. Кузьменко // Автомат. сварка. – 2008. – № 10. – С. 12–18.
 23. *Регель В. Р.* Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

Поступила в редакцию
21.12.11