

ПРОБЛЕМЫ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ *)

Дж. Холломон и К. Зинер

1. ВВЕДЕНИЕ

Прочность или твёрдость наших современных металлов не может быть увеличена посредством известных методов без придания металлам хрупких свойств. Практическое увеличение прочности может быть поэтому достигнуто только в результате разъяснения проблем разрушения металлов. Многие вопросы динамики распространения трещин ещё не вполне выяснены, как, например, факторы, определяющие скорость и направление распространения. Однако разрешение этих вопросов не приведёт к повышению полезной прочности металлов, так как трещина, независимо от точного пути и скорости её распространения, делает деталь негодной. Настоящая статья посвящена поэтому проблемам, относящимся главным образом к начальной стадии процесса разрушения металлов.

II. ОБЩАЯ КАРТИНА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Уже давно известно, что металлы, вязкие в одних условиях, разрушаются хрупко в других. Так, металлы нередко являются пластичными при простом растяжении при умеренных температурах, но хрупкими при низких и при высоких температурах или при более сложной системе напряжений. Было бы весьма желательно найти надёжную схему, при помощи которой по измерениям, проведённым в одних условиях, можно было бы предсказать, как будет происходить разрушение металла в других условиях. Такая схема была предложена в 1909 г. Лудвиком¹. Основным её положением является признание того обстоятельства, что напряжение в момент разрушения пластичного материала есть разрушающее напряжение материала, подвергнувшегося критической деформации, а не первоначального материала. Лудвик рассматривал две функции деформации, представленные на рис. 1. Одна из них — «напряжение течения», определяемое как растягивающее напряжение, необходимое для того, чтобы вызвать дальнейшую пластическую деформацию. Другая функция — действительное разру-

*) Journal of Applied Physics., 17, 82 (1946), перевод Н. Фукса.

шающее напряжение, определяемое как растягивающее усилие, которое потребовалось бы для разрушения материала, если бы дальнейшая пластическая деформация не имела бы места. Металл деформируется при растяжении пластически, пока напряжение течения меньше действительного разрушающего напряжения. Разрушение происходит при деформации, отвечающей точке пересечения кривых напряжения течения и действительного разрушающего напряжения. Преимущество схемы Лудвика в том, что она приводит влияние нескольких факторов — распределения напряжений, температуры и скорости деформации на разрушение металла — к влиянию их на величину напряжения течения и действительного разрушающего напряжения. Успех схемы зависит от того, насколько надёжно определение зависимости указанных двух функций от различных факторов. Недостаток схемы Лудвика, помешавший ей сделаться общепринятой, состоит в том, что действительное разрушающее напряжение может быть непосредственно измерено только при одном значении деформации, именно при деформации в момент разрушения металла. Для других же значений деформации величину действительного разрушающего напряжения можно рассчитать лишь приблизительно.

Ближе всего ведёт к цели метод нахождения кривой действительного разрушающего напряжения, впервые применённый Давиденковым и Витманом², а впоследствии нами³. Метод этот применим ко всем металлам, которые способны значительно деформироваться при комнатной температуре, но хрупки при некоторой более низкой температуре. По этому методу образцы сперва подвергаются растяжению разной величины при комнатной температуре, затем температура понижается, и образцы разрываются без дальнейшего увеличения деформации. Разрушающее напряжение, измеренное при низкой температуре, наносится на график в функции деформации при комнатной температуре. Приблизительное положение кривой действительного разрушающего напряжения при комнатной температуре определяется теперь, исходя из предположения, что она параллельна кривой, найденной при низкой температуре. Метод иллюстрируется на рис. 2. Его можно усовершенствовать, проводя измерения разрушающего напряжения для ряда низких температур и тем самым отчасти оправдывая указанное, не вполне обоснованное предположение.

Перлитные стали (содержащие пластинчатые карбиды) и некоторые твердеющие при старении сплавы хрупки при низких температурах и для них кривые действительного разрушающего напряжения могут



Рис. 1. Представление о разрушении металла по Лудвику.

быть найдены указанным способом. Типичные результаты для перлитной стали представлены на рис. 3. Все образцы, деформированные при комнатной температуре более чем на несколько процентов, разорвались при низкой температуре практически без дальнейшей деформации. Образец, не деформированный при комнатной температуре, обладал, однако, при низкой температуре пределом текучести (рис. 4) и разорвался фактически при более низком напряжении, чем то, которое он выдерживал до деформации. Отсюда можно сделать вывод, что по крайней мере для этого типа стали*) кривая действительного разрушающего напряжения имеет форму, показанную на рис. 5.



Рис. 2. Метод нахождения кривой действительного разрушающего напряжения.

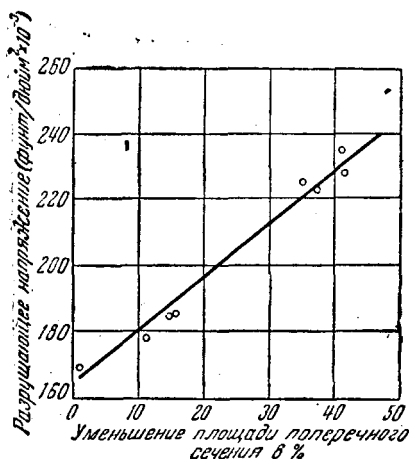


Рис. 3. Влияние предварительной деформации на разрушающее напряжение при -190°C (перлитная сталь).

ции их. Пока не удалось ещё найти условий испытания, которые придавали бы металлам хрупкие свойства так удобно, как это достигается охлаждением (в случае перлитных сталей).

*) Аналогичные результаты получены были с образцами других сходных с этими сталей.

Действительное разрушающее напряжение может обладать высокой степенью анизотропии. Наиболее обычный пример анизотропии мы встречаем в прокатанном металле: прокатка повышает действительное разрушающее напряжение по направлению прокатки и понижает его в поперечном направлении. В предыдущей работе одного из нас⁴ отмечено, что продольный разрыв некоторых сталей можно объяснить лишь на основании анизотропного влияния деформации на разрушающее напряжение. Как уже указывалось, растяжение повышает разрывающее напряжение, требующееся для разрыва образца по плоскости, перпендикулярной к оси растяжения. Для того чтобы испытываемый на растяжение образец мог разорваться продольно, напряжение, требующееся для разрыва металла по плоскости, параллельной оси, должно уменьшиться настолько, чтобы обусловленное образованием шейки и направленное по окружности напряжение могло бы разрушить металл. Наоборот, предварительное сжатие понижает растягивающее напряжение, необходимое для разрыва образца при последующем его растяжении. Примеры такого действия сжатия часто встречаются при изгибе. Так, образец, согнутый настолько, что ещё выдерживает дальнейшее сгибание в том же направлении, может хрупко сломаться при попытке его разогнуть. Анизотропию действительного разрушающего напряжения можно также наглядно продемонстрировать, растягивая образцы, предварительно подвергнутые пластическому скручиванию. Как обнаружил Свифт⁵, если образец перед растяжением был достаточно сильно скручен, разрушение происходило не по плоскости, соответствующей максимальному растягивающему напряжению, т. е. поперечной плоскости, а по винтовой поверхности. Хотя известно много примеров анизотропии



Рис. 4. Понижение разрушающего напряжения благодаря начальной деформации (перлитная сталь при -190°C).

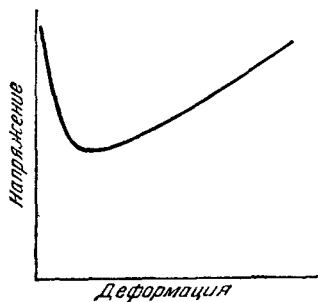


Рис. 5. Предполагаемая форма кривой действительного разрушающего напряжения (для перлитных сталей).

действительного разрушающего напряжения, до сего времени она ещё не исследована количественно. В частности, не было проведено измерений для определения зависимости между действительным разрушающим напряжением и уменьшением поперечного сечения при прокатке

В некоторых часто встречающихся условиях пластическая деформация в одном поперечном направлении невозможна благодаря наличию ограничителей. Было проведено много опытов с целью определения влияния одноосного поперечного напряжения на разрушающее напряжение. Однако, для того, чтобы можно было правильно истолковать результаты таких опытов, необходимо при их проведении допускать изменения лишь в распределении напряжений, так как в таких испытаниях при изменении распределения напряжений нередко меняются и другие факторы, например, деформация в момент разрушения. Рассмотрим в качестве примера тонкостенную трубу, подвергнутую

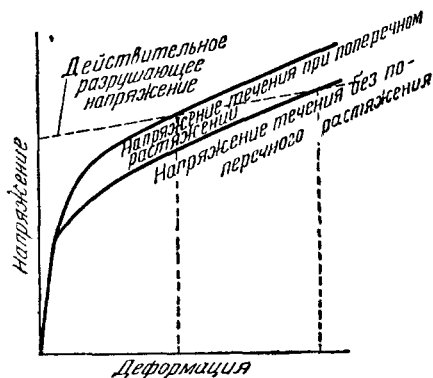


Рис. 6. Предполагаемое влияние поперечного напряжения на кривую течения и на величину деформации в момент разрушения (если действительное разрушающее напряжение не изменяется).

одновременно продольному растяжению и внутреннему давлению. Благодаря наличию поперечного напряжения растягивающее усилие, требующееся для пластического течения, повышается, и деформация в момент разрушения также изменится (рис. 6), если только кривая действительного разрушающего напряжения не сдвинется аналогично. Кроме того, если напряжение по окружности трубы делается больше осевого, то вместо поперечного разрыва может произойти продольный. Благодаря анизотропии напряжения, требующееся для разрыва в новом направлении, может иметь совершенно иную величину и, что ещё важнее, может находиться в совершенно другой зависимости от де-

формации. Проведённые Зибелем и Майером⁶ испытания на растяжение полых цилиндров, подвергнутых одновременно внутреннему давлению, показывают, что одноосное поперечное напряжение не влияет на величину действительного разрушающего напряжения, если только принять, что в применённых этими авторами однофазных материалах действительное разрушающее напряжение не зависело от деформации. Существует также косвенное подтверждение того положения, что поперечное напряжение при ограничении поперечной деформации в одном направлении не изменяет действительного разрушающего напряжения: так, хрупкий излом перлитных сталей при ударных испытаниях надрезанных образцов может быть объяснён только при предположении, что одноосное поперечное напряжение влияет на действительное разрушающее напряжение значительно меньше, чем на напряжения течения⁷. В высшей степени желательно иметь прямые данные о зависимости действительного разрушающего напряжения от одноосного поперечного напряжения.

Реже встречается случай двухосного поперечного растяжения. Посредством испытаний на растяжение образцов с выточками различной глубины и радиуса кривизны по окружности образцов Кунтце⁸, Мак-Адам⁹ и Сакс¹⁰ пытались определить влияние двухосного поперечного растягивающего напряжения на действительное разрушающее напряжение, обозначенное ими как «техническая прочность». В этих измерениях среднее продольное напряжение в момент излома принималось за разрушающее напряжение. Попытки истолкования зависимости этого напряжения от различных условий испытания обычно наталкиваются на очень большие трудности. По заключению указанных авторов посред-

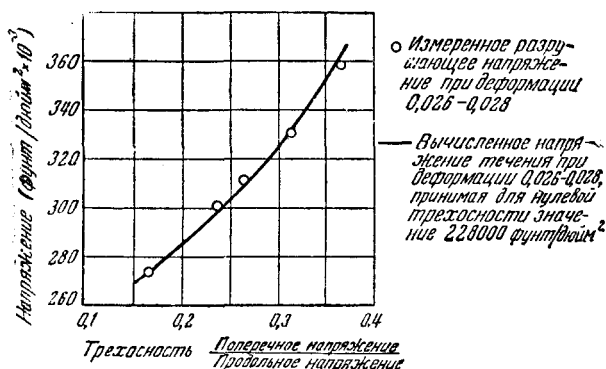


Рис. 7. Зависимость разрушающего напряжения от двухосного поперечного растяжения (по данным Сакса¹⁰).

ством таких измерений можно выяснить влияние на величину действительного разрушающего напряжения трёх отдельных факторов: величины деформации, характера напряжений и распределения их по всему объёму образца. В одном случае Саксу и его сотрудникам удалось получить одну и ту же относительную деформацию (0,026 — 0,028) в момент разрыва образца при нескольких глубинах и радиусах закруглений выточек; таким образом фактор величины деформации здесь исключался. Если принять, что при различной глубине и радиусах закруглений в выточках распределение напряжений во всей ненадрезанной области остаётся в основном постоянным, то наблюдаемое изменение разрушающего напряжения можно считать за эффект трёхосности напряжения (отношения поперечного напряжения к продольному). Полученные Саксом результаты представлены на рис. 7. Надёжность этих результатов видна из хорошего совпадения измеренного разрушающего напряжения с вычисленным напряжением течения в момент разрыва образца. Возрастание действительного разрушающего напряжения с увеличением биаксиального поперечного растяжения, показанное на рис. 7, подтверждает прежние выводы Мак-Адама и его сотрудников. Постоянство деформации в момент разрыва означает,

что в этом частном случае действительное разрушающее напряжение возрастает с ростом двухосного поперечного растяжения с точно такой же скоростью, как и напряжение течения, и, следовательно, что двухосное поперечное растяжение не увеличивает хрупкости металла. Этот вывод резко расходится с общепринятыми взглядами на влияние трёхосных напряжений. Исследования предложенного Саксом типа следует поэтому продолжить.

Разрушение стали легче всего происходит под действием удара при низких температурах. Известно, что напряжение течения во всех сталях возрастает как при понижении температуры, так и при увеличении скорости деформации. Как показали опыты³, действительное разрушающее напряжение также возрастает с понижением температуры, но не так быстро, как напряжение течения. Получающееся таким образом относительное возрастание напряжения течения по отношению к действительному разрушающему напряжению ведёт в случае перлитных сталей к хрупкости. Вследствие сравнительно малого эффекта небольших изменений скорости деформации, достижимых в обычных типах машин для механических испытаний и сравнительно большого разброса результатов испытаний, в настоящее время нельзя сделать никаких выводов о влиянии скорости деформации на действительное разрушающее напряжение.

При некоторых условиях почти хрупкое разрушение металлов возможно и при высоких температурах. Как впервые заметили Розенгайн и Арчбэтт¹¹, это — условия, благоприятствующие скольжению вдоль границ между зёрнами. В этих условиях можно считать, что действительное разрушающее напряжение уменьшается с течением времени, даже при незначительной величине деформации. Это представление об убывании действительного разрушающего напряжения со временем приводит к мысли о новых интересных опытах, ещё не проводившихся до сего времени. Так, если предварительно понизить действительное разрушающее напряжение образца приложением нагрузки при повышенной температуре, а затем понизить температуру образца до комнатной, не снимая нагрузки, действительное разрушающее напряжение должно остаться пониженным и привести таким образом к хрупкому разрушению при комнатной температуре.

III. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Уже давно известно, что наблюдаемые значения разрушающего напряжения в металлах и вообще всех кристаллических веществах по меньшей мере на два порядка величины меньше напряжения, вычисленного, исходя из действующих между атомами сил. Единственной возможностью объяснения этого расхождения между теорией и опытом является предположение, что разрушение материала происходит в любой момент только в отдельных участках, в которых напряжение значительно выше, чем среднее приложенное напряжение.

Концентрация напряжений в отдельных участках впервые подробно исследовалась Инглисом¹², указавшим на то, что растягивающее напряжение у дна выточки может значительно превысить среднее по всему образцу значение напряжения. Коэффициент концентрации напряжений равен в этом случае $1 + 2(a/\rho)^{1/2}$, где a — глубина выточки, ρ — радиус кривизны дна выточки. Иоффе¹³ и его сотрудники нашли, что расхождение между обычно наблюдаемой и теоретически вычисленной величиной разрывающего напряжения для кристаллов каменной соли можно вполне объяснить присутствием играющих роль надрезов небольших поверхностных трещинок. Погружая образцы каменной соли в воду во время испытания и непрерывно растворяя таким образом поверхностный слой, эти авторы смогли увеличить фактическое разрывающее напряжение в 400 раз. В этих условиях разрывающее напряжение действительно почти равно теоретической его величине.

Тщательно изготовленные образцы металла, повидимому, не имеют дефектов, обнаруженных в сухих кристаллах каменной соли. Недостаточная прочность металлических образцов обусловлена дефектами внутри самого металла; действительно, если только деформация (при растягивании) достигла стадии образования шейки, разрыв начинается внутри образца и распространяется к периферии. То, что разрыв должен начаться внутри вытянутых в шейку образцов, понятно из произведённого Бриджменом¹⁴ анализа распределения напряжений в суженной в шейку области. При этом распределении растягивающее напряжение достигает максимума вдоль оси и минимума у поверхности образца. Следует ожидать, что кристаллы металла, обладающие одинаковой степенью чистоты с применёнными Иоффе кристаллами каменной соли, обнаружат столь же высокую относительную прочность. Однако до сего времени не было проведено опытов, которые могли бы подтвердить правильность этого взгляда.

Сравнительно низкое разрушающее напряжение реальных металлов легче всего объяснить наличием микротрещин внутри самого металла. Исходя из замечания, что трещина будет распространяться дальше только в том случае, если полная свободная энергия системы при этом уменьшится, Гриффит¹⁵ пришёл к выводу, что трещина в форме круга с радиусом a сможет распространиться только при условии, что растягивающее напряжение в перпендикулярном к трещине направлении превысит некоторую критическую величину S . В формуле Гриффита

$$S = (\sigma G / ca)^{1/2} \quad (1)$$

σ означает поверхностную энергию на единицу поверхности, G — модуль сдвига, а c — константу величиной порядка единицы. Гриффит вывел своё уравнение и получил опытное его подтверждение лишь для аморфных веществ. Сопротивление таких веществ пластической

деформации быстро растёт с понижением температуры, так что при достаточно низких температурах, например, при комнатной температуре для обыкновенного стекла, распространение трещины может и не сопровождаться пластической деформацией. Таким образом, в аморфных веществах, в которых возникшая в результате распространения трещины новая поверхность не испытала пластической деформации, величина поверхностной энергии, которую следует вставить в уравнение (1), весьма близка к легко измеримой поверхностной энергии вещества в расплавленном состоянии. В случае кристаллических веществ положение сложнее. С одной стороны, сопротивление их пластической деформации сравнительно медленно возрастает с понижением температуры, так что исключить эту деформацию простым понижением температуры обычно не удаётся. С другой стороны, законы пластической деформации, найденные путём макроскопических измерений, неприменимы, если напряжение заметно изменяется на расстоянии

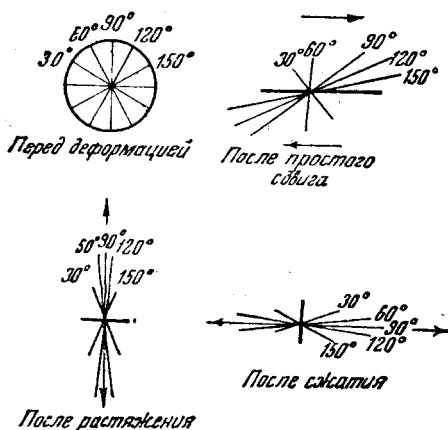


Рис. 8. Реориентация микротрещин при деформации.

меньше, чем линейные размеры отдельного кристаллита. Напряжение, значительно превышающее предел текучести, не обязательно ведёт к пластической деформации, если оно действует в достаточно ограниченном участке. До сего времени не изучен вопрос о том, при каких условиях может происходить распространение трещины, не сопровождающееся пластической деформацией. Если пластическая деформация имеет место, связанная с ней энергия должна быть добавлена к поверхностной энергии σ , чтобы сделать уравнение (1) применимым в данном случае.

Хотя неизвестность точного значения поверхностной энергии σ не даёт возможности количественного применения уравнения (1) к металлам, идеи Гриффита всё же могут быть использованы с качественной стороны, для того чтобы связать различные явления, наблюдающиеся при разрушении металлов¹⁶. Эти явления связаны с реориентацией и искажением микротрещин при деформации. Рис. 8 показывает, как первоначальное случайное распределение микротрещин приобретает при деформации в высокой степени анизотропный характер. Так, при растяжении трещины удлиняются в направлении оси растяжения и укорачиваются в поперечном направлении. Критическое растягивающее напряжение, необходимое для того, чтобы вызвать распростране-

ние некоторых трещин и таким образом привести к разрушению, повышается благодаря деформации в случае продольного напряжения и понижается в случае поперечного. С самым обычным примером этого явления мы встречаемся при прокатке металла: разрушающее напряжение возрастает в направлении прокатки и понижается в поперечном направлении. Другим примером могут служить обычные испытания на растяжение некоторых сталей, в которых предварительное растяжение повышает разрушающее напряжение по перпендикулярной к оси образца плоскости и понижает его по плоскости, параллельной оси. Действительно, как указывалось выше, разрушающее напряжение под действием поперечного растяжения может понизиться настолько, что поперечное растягивающее напряжение, существующее в шейке растягиваемого образца, приводит к продольному, а не поперечному разрыву образца. Самый яркий пример влияния реориентации микротрещин на разрушение металла мы встречаем в том случае, когда образец сперва пластически скручивается, а затем растягивается. Наблюдаемая при этом спиральная трещина принадлежит как раз к тому типу, который можно было ожидать на основании разбора эффекта реориентации¹⁶.

В то время как эффект реориентации микротрещин легко понятен, в вопросе о природе и происхождении микротрещин существует большая неясность. Неметаллические включения вроде окислов и сульфидов железа, содержащиеся в стали, без сомнения ведут к концентрации напряжений и могут рассматриваться для некоторых целей как микротрещины, являющиеся причиной разрушения. В самом деле, известно, что прочность стали тем ниже, чем она «грязнее», т. е. чем больше в ней содержится неметаллических включений. Известно также, что горячая обработка влечёт за собой реориентацию микротрещин, не исчезающую при термической обработке, вызывающей рекристаллизацию основной массы металла. Таким образом эффект реориентации можно приписать лишь действию неметаллических включений. Однако разрушение металла нельзя описать, исходя исключительно из роли, играемой неметаллическими включениями; известно, что структура основной массы металла также оказывает существенное влияние на разрушающее напряжение. Так, в стали мартенситовая структура после отпуска (сфероидальные карбиды) обладает более высоким разрушающим напряжением при малых деформациях, чем перлитная структура (пластинчатые карбиды), оказывающая то же сопротивление пластической деформации; для определённого типа структуры разрушающее напряжение тем выше, чем мельче частицы карбидов. Источники концентрации напряжений должны, следовательно, содержаться в основной массе металла. Концентрация напряжений в определённой точке металла является, таким образом, функцией двух факторов, обусловленных загрязнениями и структурой основной массы металла. На основании имеющегося экспериментального материала пока ещё невозможно определить относительную роль этих факторов.

Большая неясность существует и в вопросе о происхождении концентрации напряжений в основной массе металла. Если последняя содержит выделившиеся частицы, вроде карбидов в стали, эти частицы являются источниками некоторой концентрации напряжения. Величина концентрации напряжений зависит от размера и формы этих частиц: как уже указывалось, частицы, имеющие форму пластинок, ведут к более значительной концентрации напряжений, а следовательно, к более низким значениям разрушающего напряжения, чем сфероидальные частицы. Вскоре появится работа одного из авторов настоящей статьи (Холломона), в которой доказывалось, что при возрастании размера карбидных частиц увеличивается связанная с ними концентрация напряжений. Эти данные, однако, недостаточно полны для точных количественных выводов.

Независимо от присутствия частиц выделений, концентрация напряжений в металле появляется также в результате самого процесса пластической деформации. Как впервые указано Орованом¹⁷, концентрация напряжений происходит у краёв полос скольжения. Один из авторов настоящей статьи¹⁸ привёл примеры разрушения металла, которые можно объяснить только в предположении, что такая концентрация напряжений способна возрасти со временем совершенно так, как будто полосы скольжения обладали вязкими свойствами.

Следует полагать, что такая концентрация напряжений должна возрастать с расширением полос скольжения и, следовательно, с возрастанием величины зерна. До сего времени влияния величины зерна, самого по себе, обнаружить не удалось. Общеизвестно, что стали с малой величиной зерна обладают лучшими механическими свойствами, чем стали с крупным зерном. Однако, в сталях величина зерна существенно влияет на характер выделения карбидов, и поэтому непосредственное влияние величины зерна определить невозможно. Связанная с пластической деформацией концентрация напряжений обладает тем исключительным свойством, что она отсутствует, до того как произойдёт какая-нибудь пластическая деформация. Следует, таким образом, ожидать, что разрушающее напряжение хорошо отожжённых образцов будет до небольшой пластической деформации выше, чем после неё. Результаты, представленные на рис. 4 и 7, следует считать дальнейшим подтверждением того взгляда, что действительное разрушающее напряжение недеформированного материала может иметь очень большую величину. Ещё одним подтверждением тесной связи разрушающего напряжения с пластической деформацией является наблюдение, что разрушающее напряжение изменяется со скоростью деформации и с температурой приблизительно так же, как сопротивление пластической деформации. До сего времени не было предпринято опытов с целью определить, какое точно напряжение может выдерживать, не разрушаясь, недеформированный образец.

Так как концентрация напряжений может возникнуть в результате самой пластической деформации, то не исключено, что прочность

образцов может быть изменена посредством изменений в условиях испытания. Пример этого явления недавно описан Бриджменом¹⁹. Он нашёл, что при одинаковом растяжении двух идентичных образцов — одного при атмосферном, а другого при высоком давлении — последний затем выдерживает под атмосферным давлением значительно большую добавочную деформацию, чем первый, и, следовательно, обладает гораздо более высоким разрушающим напряжением. Повидимому, при высоком давлении большая концентрация напряжений не может вызвать раскрытия микротрещин. Аналогичный эффект могла бы произвести начальная деформация при повышенной температуре при условии, что температура не настолько высока, чтобы вызвать явление возврата или рекристаллизации. При повышенной температуре потребовалось бы меньшее напряжение, чтобы вызвать определённую величину растяжения, чем при комнатной, и поэтому образовалось бы, возможно, меньше микротрещин. Опытов для доказательства этой зависимости прочности образцов от температуры предварительной деформации ещё не было поставлено. Возможно, что образование полос двойникования приводит к большей концентрации напряжений у их краёв, чем образование полос скольжения, так как некоторые опыты указывают на связь полос двойникования с хрупким изломом металлов²⁰.

Уже в 1920 г. Розенгайн со своими сотрудниками¹¹ убедительно доказал, что границы между зёрнами обладают вязкими свойствами и что поэтому малая скорость деформации и высокая температура благоприятствуют скольжению вдоль этих границ и что такое скольжение ведёт к преждевременному разрушению металла. Хотя это и не высказано прямо Розенгайном, очевидно, что преждевременное разрушение имеет причиной концентрацию напряжений, вызванную скольжением вдоль границ зёрен. К сожалению, представление о вязких свойствах границ между зёрнами недостаточно использовано металловедом в США. Благодаря этому за протекшие со времени появления работы Розенгайна 25 лет не было достигнуто никакого прогресса в исследовании факторов, влияющих на образование концентрации напряжений, вызванной вязким скольжением вдоль границ зёрен.

Указанное представление наводит на мысль о ряде интересных, ещё не поставленных опытов. Например, концентрация напряжений, вызванная приложением усилия при высокой температуре, может быть заморожена охлаждением до комнатной температуры под нагрузкой, и металл приобретёт, таким образом, хрупкие свойства.

Образец, способный выдержать определённое напряжение в течение неопределённо долгого времени, может разрушиться, если он подвергается напряжению, многократно меняющему свой знак. Разрушение при переменном напряжении, называемое усталостью, известно уже свыше 80 лет. Практическое значение усталости привело к накоплению многочисленных экспериментальных данных, полученных

для различных металлов, о связи между числом циклов, необходимых для разрушения, и максимальным приложенным напряжением при различных условиях. В США по вопросу о механизме разрушения, вызванного усталостью, сделано ещё мало. В Британской Национальной физической лаборатории было проведено подробное описательное исследование возникновения и распространения трещин усталости в моно- и поликристаллах. Старые работы, в которых рассматриваются также постепенные изменения в петлях гистерезиса, разобраны в монографии Мура и Коммерса²¹. Обзор описательного исследования, начатого в Национальной физической лаборатории Юингом²² с сотрудниками и продолженного Гау с сотрудниками, по вопросу об образовании трещин усталости и их связи с полосами скольжения составлен Гау²³.

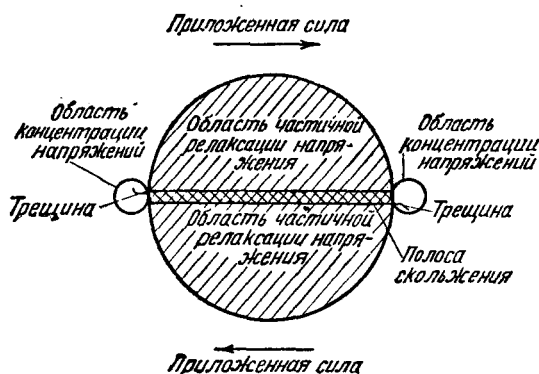


Рис. 9. Распределение напряжений вблизи свежесформировавшейся полосы скольжения.

ния ведёт к качественному объяснению основных фактов в явлении усталости. Такое распределение напряжений изображено на рис. 9 для того случая, когда полоса скольжения уже образовалась, но приложенное усилие ещё не снято. Срезающее напряжение в областях, расположенных по обеим сторонам полосы скольжения, успело понизиться благодаря частичной релаксации. Наоборот, в областях, непосредственно прилегающих к краям полосы скольжения, срезающее напряжение достигло большой величины. Связанное с этим высокое растягивающее напряжение ведёт к образованию маленьких трещин, как показано на рисунке. Размеры трещин слишком малы, чтобы они могли распространиться под действием приложенного напряжения за пределы зоны концентрации напряжений. Так как величина этой зоны сравнима с шириной полосы скольжения, то длина трещины также сравнима с шириной полосы. При обращении напряжения те области, в которых имела перед этим место релаксация, подвергнутся теперь напряжению, превышающему приложенное усилие. Если первоначально

Не было сделано попытки истолковать результаты этих наблюдений с точки зрения микроструктуры, за исключением введённого Юингом и Хемфри²² представления об истирании, согласно которому структура полос скольжения по мере приложения переменного напряжения делается всё более беспорядочной.

Беглый анализ распределения напряжений вблизи полосы скольжения

образовавшаяся полоса скольжения не может больше деформироваться, прилегающая к ней зона будет скользить в обратном направлении, снова частично ослабля срезывающее напряжение в прилегающих областях. Каждое последовательное изменение знака напряжения увеличивает, таким образом, ширину полосы скольжения, а, следовательно, и длину трещин у краёв полосы. Когда длина трещин достигнет достаточной величины, произойдёт разрушение образца.

Вышеизложенное описание процесса, происходящего в полосе скольжения в условиях усталости, показывает, что полоса скольжения должна при этом обязательно расширяться. Это действительно и наблюдается¹⁵. Кроме того, мы видим, что возрастание усталости тесно связано с остаточными напряжениями в области окружающей полосы скольжения. Если эти напряжения можно было бы каким-нибудь образом ослабить, то тем самым было бы исключено накопление усталости под действием всего предыдущего скольжения. Вредное действие перегрузки и его устранение посредством недогрузки можно, повидимому, также объяснить на основании этих остаточных напряжений. Вышеизложенное описание наводит на мысль о целом ряде ещё не принятых никем опытов, как например: измерение разрушающего напряжения до наступления вызванного усталостью разрушения в функции числа циклов переменного напряжения; устранение вредного влияния уже появившейся усталости путём приложения ряда напряжений переменного знака с медленно убывающей амплитудой.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Ludwik, *Elemente der technologischen Mechanik* (Berlin, 1909).
2. Н. Давиденков и Ф. Витман, Механический анализ ударной хрупкости, *Журн. Техн. Физ.* **4**, 3 (1937).
3. J. H. Hollomon and C. Zener, Условия разрушения стали, *Trans. Am. Soc. Min. Met. Eng.* **158**, 283 (1944).
4. J. H. Hollomon, Хрупкость отпуска. (Сообщение в Америк. о-ве металлов.)
5. H. W. Swift, Влияние перенапряжения при скручивании на растяжение мягкой стали, *J. Iron and Steel*, **140**, 181 (1939).
6. E. Siebel und A. Maier, Влияние многоосного напряжения на пластичность, *VDI*, **77**, 1345 (1933).
7. J. H. Hollomon, Испытания на удар надрезанных образцов, *Trans. Am. Soc. Min. Met. Eng.*, **158**, 298 (1944).
8. W. Kuntze, Обзор и библиография см. D. I. McAdam, *Trans. Am. Inst. Min. Met. Eng.* **150**, 311 (1942).
9. D. I. McAdam, Техническая прочность металлов и главные напряжения, *Metals Tech.* (декабрь 1944).
10. G. Sachs, J. D. Lubahn and E. J. Ebert, Влияние надрезов разной глубины на прочности термически обработанных малолегированных сталей, *Trans. Am. Soc. Metals*, **34**, 517 (1945); G. Sachs and J. D. Lubahn, Влияние трёхосности на техническую прочность сталей, *A.S.M.E.* (1945).
11. W. Rosenhain and S. L. Archbutt, Об интеркристаллическом разрушении металлов при длительном действии напряжения, *Proc. Roy. Soc.*, **95**, 55 (1919—1920).

12. C. E. Inglis, Напряжения в листовом металле, обусловленные наличием трещин и острых углов, *Trans. Inst. Naval Architects*, **55**, 1, 219 (1913).
 13. A. Joffe, Пластичность и прочность кристаллов, *Proc. Inst. Int. Congr. Appl. Mech. Delft* (1924).
 14. P. W. Bridgman, Распределение напряжений в шейке растягиваемого образца, *Trans. Am. Soc. Metals*, **32**, 553 (1944).
 15. A. A. Griffith, Явления течения и разрывы в твёрдых телах, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **221**, 163 (1920).
 16. C. Zener and J. H. Hollomon, Пластическое течение и разрыв металлов, *Trans. Am. Soc. Metals*, **33**, 163 (1944).
 17. E. Orowan, О пластичности кристаллов, *Zschr. f. Phys*, **89**, 605, 614, 634 (1934).
 18. C. Zener, Неупругость металлов (в печати, A.I.M.E.).
 19. P. W. Bridgman, *Rev. Mod. Phys.*, **17**, 3 (1945).
 20. Н. Давиденков, Динамические испытания металлов (ОНТИ, 1936).
 21. H. F. Moore and J. B. Kommers, *The Fatigue of Metals* (McGraw-Hill, New York, 1927).
 22. J. A. Ewing and J. C. W. Humphrey, Разрушение металлов при повторных изменениях напряжения, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, **200A**, 241 (1903).
 23. H. J. Gough, Связь между кристаллической структурой и разрушением металлов, особенно при усталости, *Proc A.S.T.M.* **33**, Pt. 2, 3 (1933).
-