

Академик Е. А. ЧУДАКОВ и Г. В. УЖИК

## ОБ ОСОБОМ СОПРОТИВЛЕНИИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПОВТОРНОМ (НЕКОНТАКТНОМ) СЖАТИИ\*

Одним из авторов этого сообщения (Е. А. Чудаков) уже давно было высказано предположение о том, что для деталей, работающих при повторной нагрузке, симметричная форма сечения не является наивыгоднейшей, как это имеет место для деталей, воспринимающих статическую нагрузку.

Так как для конструкционной стали усталостная прочность на сжатие значительно больше, чем на растяжение, то для лучшего использования металла деталь должна иметь такое сечение, при котором напряжение на сжатие получилось бы больше напряжения на растяжение.

Это предположение уже подтверждается отдельными примерами из практики. Передняя ось автомобиля (работающая на переменную нагрузку) в наиболее опасном сечении выполняется обычно несимметричной: большее напряжение получается на сжатие. Листы для автомобильных рессор начинают изготавливать не прямоугольного, а профильного сечения, при котором напряжение на сжатие получается также больше напряжения на растяжение.

Экспериментальная проверка высказанного выше положения представляет большой практический интерес, так как в случае его подтверждения для многих деталей машин, а также элементов сооружений, подвергающихся повторному изгибу, целесообразной явится несимметричная форма, обеспечивающая одинаковую надежность как в области растяжения, так и в области сжатия. В результате может быть достигнуто заметное снижение веса таких деталей при той же их надежности.

Между тем вопрос о сопротивлении металлов при повторном сжатии освещен чрезвычайно слабо (<sup>1, 2</sup>), особенно применительно к режимам с наименьшим сжимающим напряжением цикла ( $\sigma_{\min} < 0$ ) (<sup>3, 4</sup>). Что же касается вопроса о сопротивлении металлов повторному сжатию при наличии концентрации напряжений в условиях тех же режимов, то нам неизвестно, чтобы этот вопрос вообще где-либо рассматривался.

Поэтому были проведены специальные эксперименты для оценки сопротивления металла на сжатие при повторных нагрузках.

Несмотря на то, что пока еще не удалось проверить этот вопрос применительно к широкому кругу конструкционных металлов и разных видов нагрузки, полученные результаты уже сейчас позволили обнаружить существование особого, а в некоторых

\* В этом сообщении рассматривается вопрос о сопротивлении металла при повторном сжатии вне зоны контакта сжимаемых тел, т. е. тот случай, когда сжатие осуществляется посредством повторного изгиба (сжатая зона) или осевого сжатия участков, удаленных от мест приложения нагрузок.

условиях нагружения необычайно высокого сопротивления металла повторному сжатию.

Экспериментальное исследование было проведено на стали 45 со средним содержанием углерода.

В состоянии после нормализации эта сталь обладала следующими свойствами: предел текучести при растяжении и при сжатии  $40,0 \text{ кг/мм}^2$ ; предел прочности  $65,0 \text{ кг/мм}^2$ ; поперечное сужение при разрыве  $\geq 5\%$ ; предел усталости при изгибе с вращением  $25,0 \text{ кг/мм}^2$ .

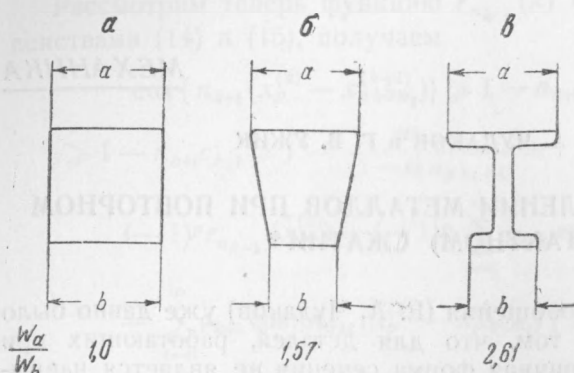


Рис. 1

Образцы, приготовленные из этой стали, имели форму поперечного сечения в виде квадрата (рис. 1 а), трапеции (рис. 1 б) и двутаврика с уменьшенной шириной одной полки (рис. 1 в).

Все испытания были проведены при повторном знакопостоянном изгибе, при котором в зоне растяжения наименьшее напряжение цикла всегда было

больше нуля ( $\sigma_{\min} > 0$ ), а в зоне сжатия всегда поддерживалось  $\sigma_{\min} < 0$ .

Испытания были проведены на 5-тонном пульсаторе гидравлического действия с частотой циклов 2000 в минуту.

### Результаты испытаний образцов с поперечным сечением в форме квадрата

Испытание было проведено при среднем напряжении цикла  $\sigma_m = 43,0 \text{ кг/мм}^2$ , превышающем предел текучести  $\sigma_s = 40,0 \text{ кг/мм}^2$ .

При этом среднем напряжении предельная амплитуда оказалась равной  $\sigma_a = 17,0 \text{ кг/мм}^2$  (см. рис. 3). База испытаний при этом составляла число циклов  $N = 2,5 \cdot 10^6$ .

Разрушение образцов всегда начиналось в зоне, подвергавшейся повторному растяжению. После того, как был установлен предельный режим  $\sigma_m = 43,0$  и  $\sigma_a = 17,0$   $\text{кг/мм}^2$  для выбранного числа (базы) циклов, были проделаны следующие опыты. На той стороне квадрата, которая подвергается повторному сжатию, по сечению, делящему длину образца пополам (рис. 2, точка К), наносился мелкий надрез, имеющий глубину  $t = 0,5 \text{ мм}$  и радиус закругления  $\rho = 0,5 \text{ мм}$ . Теоретический коэффициент концентрации напряжений при таком надрезе, согласно

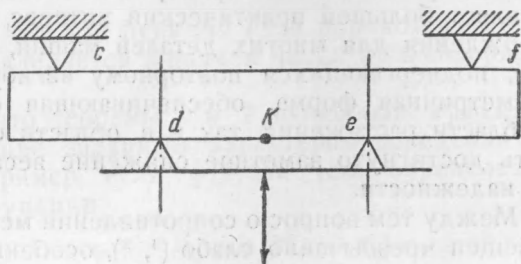


Рис. 2

Нейберу <sup>(5)</sup> составляет  $K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}} = 3,0$ . Образец с таким надрезом в сжатой зоне, подвергнутый повторному изгибу при номинальных напряжениях  $\sigma_m = 43 \text{ кг/мм}^2$  и  $\sigma_a = 21,0 \text{ кг/мм}^2$ , сломался после  $N = 1\,115\,360$  циклов в растянутой зоне. Таким образом, несмотря

на значительное, почти трехкратное, увеличение вследствие надреза, напряжения в сжатой зоне, сопротивление металла повторному сжатию оказалось столь значительным, что разрушение произошло не в сжатой, а в растянутой зоне.

Испытание другого такого же квадратного образца с надрезом в сжатой зоне, создающим вдвое большую концентрацию напряжений ( $t = 1,0$  мм;  $\rho = 0,1$  мм), опять закончилось разрушением в растянутой зоне, где напряжение было в 4—5 раз меньше по сравнению с сжатой зоной.

Эти результаты указывают на существование особого необычайно высокого сопротивления металла повторному сжатию.

Результаты испытаний образцов с поперечным сечением в форме трапеции и двутаврика с уменьшенной шириной одной полки

Испытания этих образцов полностью подтвердили выводы, полученные ранее на квадратных образцах с надрезами в сжатой зоне.

К сожалению, не представилось возможным произвести испытания образцов с трапециевидным сечением и с сечением в виде неполного двутавра без надрезов вследствие потери устойчивости уже при относительно небольших нагрузках. Надрезы наносились как на растянутой, так и на сжатой зонах. Несмотря на повышенное значение напряжений в сжатой зоне (от 2 до 5 раз), на всех испытанных 10 образцах (по 5 образцов каждого профиля) разрушение всегда происходило в растянутой зоне. В сжатой же зоне вблизи основания даже самых острых надрезов ( $\rho = 0,05$  мм) никаких признаков разрушения в виде трещин обнаружено не было.

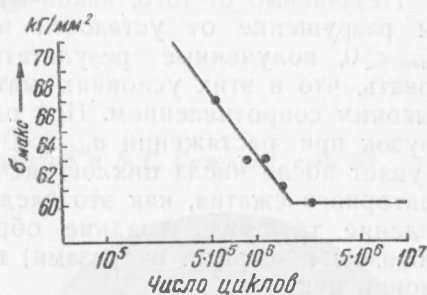


Рис. 3. Кривая усталости квадратных образцов при  $\sigma_m = 43$  кг/мм²

Результаты испытаний гладких и надрезанных образцов при повторном осевом сжатии

В связи с обнаруженным высоким сопротивлением металла в сжатой зоне (повторный изгиб) при нагрузках с  $\sigma_{мин} < 0$ , представляла интерес проверка этого же эффекта в условиях осевого сжатия при тех же режимах нагрузок ( $\sigma_{мин} < 0$ ).

Образцы были подвергнуты осевому повторному сжатию при максимальном напряжении  $\sigma_{макс} = 75,2$  кг/мм², т. е. почти вдвое превышающем предел текучести этой стали, и среднем напряжении  $\sigma_m = 46,5$  кг/мм².

После 10 миллионов циклов никаких признаков разрушения ни на одном из образцов обнаружено не было. Дальнейшее повышение нагрузки было невозможно из-за потери устойчивости.

Чтобы выяснить, возможно ли вообще разрушение от усталости при повторном осевом сжатии нагрузками с  $\sigma_{мин} < 0$ , т. е. когда полностью отсутствует растяжение, были произведены испытания в условиях максимально возможной перегрузки материала. С этой целью испытывались образцы с острыми надрезами (радиус в вершине  $\rho = 0,1$  мм;  $D = 15,0$ ;  $a = 2,5$ ), обеспечивающими большую концентрацию напряжений (теоретический коэффициент концентрации  $K_t = 7,0$ ).

Эффект значительной концентрации напряжений был усилен тем, что испытания проводились при средних напряжениях, более чем в два раза превышающих предел текучести материала: максимальное сжимающее напряжение цикла составляло  $\sigma_{\max} = 83,0$ , среднее сжимающее напряжение  $\sigma_m = 47,0$ , амплитуда  $\sigma_a = 36,0$  кг/мм<sup>2</sup>. В этих условиях трещина усталости обнаруживалась уже после первых нескольких тысяч циклов. Однако развитие ее протекало весьма медленно. На рис. 4 показана поверхность разрушения образца, разорванного на машине для статических испытаний, после 20 миллионов циклов. Периферийная зона на этой поверхности является зоной разрушения от усталости, центральные две зоны — разрушения при статическом разрыве.

Эксцентричность расположения зоны усталостного разрушения свидетельствует о том, что нагружение образца осуществлялось с перекосом. Следовательно, в данном случае появление трещин усталости и последующее их развитие могли быть вызваны повторным растяжением, возникшим вследствие перекоса и изгиба образца. Однако этот вопрос нуждается еще в дальнейшем изучении.

Независимо от того, каков будет ответ на вопрос о том, возможно ли разрушение от усталости при повторном сжатии нагрузками с  $\sigma_{\min} < 0$ , полученные результаты уже сейчас позволяют констатировать, что в этих условиях материал обладает особым, необычайно высоким сопротивлением. При одинаковой асимметрии и величине нагрузок при растяжении  $\sigma_{\min} > 0$  полное разрушение от усталости наступает после числа циклов, исчисляемого тысячами. В условиях же повторного сжатия, как это следует из приведенных результатов, появление трещины (гладкие образцы) и окончательное разрушение (образцы с острыми надрезами) не наступает даже после многих миллионов циклов.

Эти результаты свидетельствуют также о том, что действие касательных напряжений имеет совершенно различный характер при повторном сжатии в сравнении с повторным растяжением.

Таким образом, произведенные экспериментальные работы дают принципиально положительный ответ на вопрос о рациональности применения асимметричной формы для деталей, работающих при повторном изгибе, при котором напряжение на сжатие получается выше напряжения на растяжение.

Необходимо дальнейшее всестороннее изучение этого вопроса в широком интервале изменения режимов повторного сжатия и на материалах с различными механическими свойствами.

Поступило  
9 XI 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> J. O. Smith, University of Illinois Bull., **39**, No. 26 (1942). <sup>2</sup> R. Jensen and H. Moore, Proc. ASTM, **45**, 799 (1946). <sup>3</sup> H. Thomas and J. Lowter, Proc. ASTM, **2**, 241 (1932). <sup>4</sup> A. Pommer u. M. Hempel, Mitteilungen Kaiser-Wilh. Inst., **22**, 11, 169 (1940). <sup>5</sup> Н. Нейбер, Концентрация напряжений, 1947.

*К статье Е. А. Чудакова и Г. В. Ужика, стр. 40*

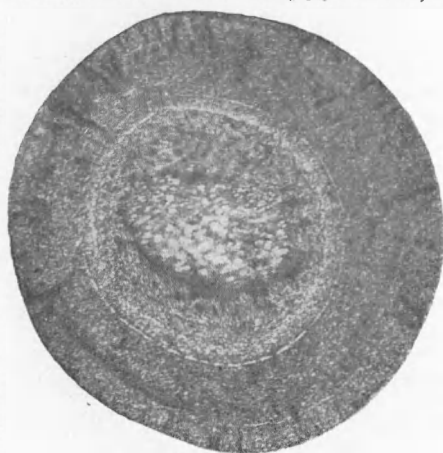


Рис. 4

*К статье К. А. Малышева, В. Д. Садовского и Б. Г. Сазонова, стр. 63*

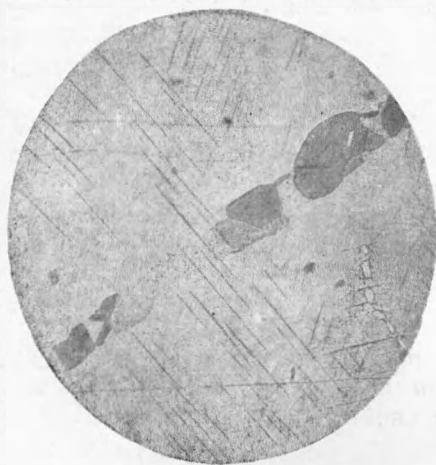


Рис. 3. Появление рекристаллизованных зерен аустенита в отдельных участках бывшей мартенситной иглы.  $\times 380$  (Н. П. Чупракова). Репр. 7:8

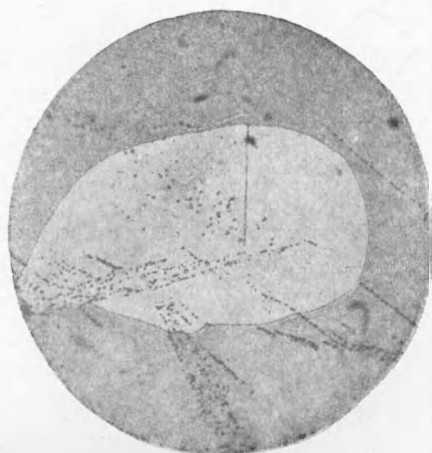


Рис. 4. Дальнейшее разрастание рекристаллизованных зерен аустенита.  $\times 380$  (Н. П. Чупракова) Репр. 7:8.