

PACS: 81.40.Np

Е.Н. Высоцкий

## ВЗАИМОСВЯЗЬ СООТНОШЕНИЯ ДЛИН РАЗДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТЕЙ ПРОКАТА С КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТИ

НПП «Станко Маш»  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 24 марта 2005 года

*Показано, что при разделении проката по схеме трехточечного изгиба на отклонение траектории трещины оказывает влияние отношение длины недеформируемой части к длине плеча приложения изгибающей нагрузки  $l''/l'$ . Наименьшее отклонение от плоскости надреза наблюдается при отношении  $l''/l' \geq 1$ .*

### Введение

Для обеспечения прямолинейного продвижения трещины в поперечном сечении проката необходимо создать такое напряженное состояние в зоне сжатия, которое бы в динамике однозначно определяло симметричный угловой коридор сжимающих напряжений с вершиной, размещенной в процессе развития трещины в плоскости симметрии. Достаточным условием для получения такого углового коридора является обеспечение равновесия сил инерционного сопротивления в недеформируемых отделяемых частях проката.

Известно [1,2], что совместное действие изгиба с учетом сил инерционного сопротивления в недеформируемых частях проката формирует своеобразный коридор сжимающих напряжений, при попадании внутрь которого трещина затормаживается, и дальнейшее ее распространение определяется влиянием на напряженное состояние сил инерционного сопротивления вне деформируемых частей проката. Предполагается, что нижняя точка углового коридора смещается относительно плоскости симметрии только при определенных соотношениях длин недеформируемых частей проката в результате динамического возмущения, вызванного силами инерции в этих частях. Это позволит для некоторых параметров длин заготовок существенно стабилизировать трещину и улучшить качество поверхности излома, а также в дальнейшем прогнозировать вероятные пути изменения трещины и способ стабилизации распространения разрушения, что дает возможность придать трассе трещины необходимое направление.

В процессе разрушения при нагружении проката трехточечным изгибом установлена связь между изгибающими силами, силами инерционного сопротивления в недеформируемых частях проката, обусловленными разностью отношений разделяемых длин, и полем сжимающих напряжений под опорной призмой, картина распределения которого и определяет вероятные пути отклонения траектории трещины в зоне сжатия [3].

### Методы исследования и материалы

Достаточным условием для симметричности распределения напряжений под опорной призмой при отделении заготовок от длинных штанг при  $l'_1 = l'_2$  является обеспечение отношения длины недеформируемой части  $l''_1$  к плечу приложения ломающей нагрузки  $l'_1$ :  $l''_1/l'_1 \geq 1$  или же разделение проката на равные части.

Минимальную величину отклонения траектории трещины от плоскости, определяемой концентратором и опорной призмой, при разделении проката на две неравные части определяли путем варьирования длин отделяемых частей и плеч приложения изгибающей нагрузки.

Исследования проводили на двух марках сталей – ст.45 и ст.ШХ15 при трехточечном нагружении с оптимальными параметрами концентратора напряжений, полученного методом внедрения ножа с глубиной надреза 3 mm, радиусом 0.1 mm и углом надреза 90°.

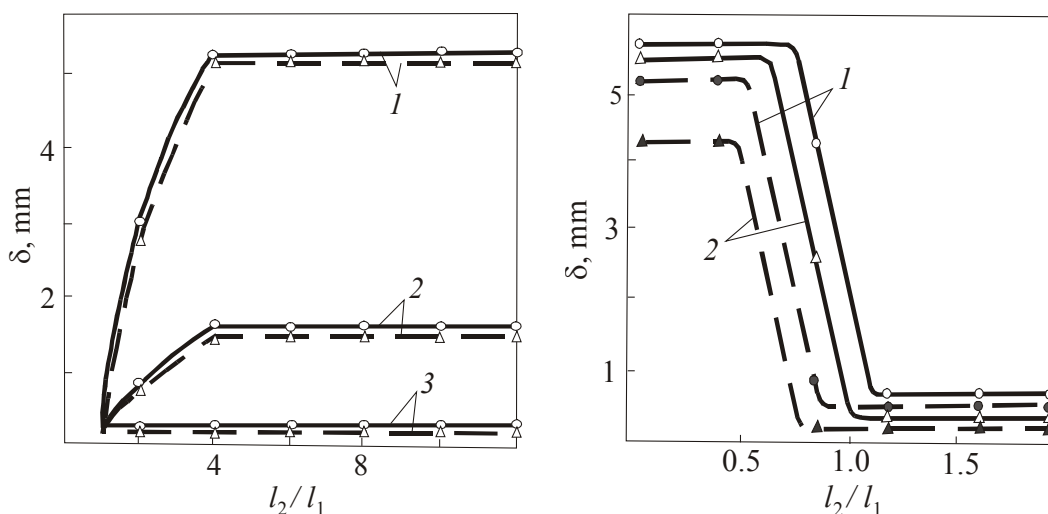
### Результаты исследований и их обсуждение

Согласно полученным данным построили графическую зависимость величины отклонения траектории трещины от соотношения длин разделяемых частей проката при  $l''_1/l'_1 = 0.15; 1.0; 1.2$ . Из графика (рис. 1) видно, что минимальное отклонение траектории трещины ( $\delta = 0.3$  mm) соответствует отношению длин разделяемых частей проката, равному 1.2.

Изменение отношения недеформируемой части заготовки к плечу изгибающей нагрузки в сторону уменьшения недеформированной части заготовки привело к увеличению отклонения траектории трещины на величину  $\delta = 1.0-5.5$  mm.

Таким образом, разница в длинах разделяемых частей и отношение недеформируемых частей к плечу приложения изгибающей нагрузки оказывают существенное влияние на характеристики качества поверхности изломов.

На основании полученных данных построена графическая зависимость величины отклонения траектории трещины от отношения длины недеформируемой части заготовки к плечу изгибающей нагрузки (рис. 2). Из графика видно, что оптимум величины отклонения траектории трещины зависит от отношения длин недеформируемой части заготовки к плечу приложения изгибающей нагрузки. Также видно, что для стали ШХ15 с повышением изгибающей нагрузки (кривая 2) величина отклонения траектории трещины имеет минимальное значение при отношении длины недеформируемой части заготовки к плечу изгибающей нагрузки, равном 1. При уменьшении плеча от 50 до 35 mm (кривая 1) оптимум отклонения трещины находится при отношении больше 1.



**Рис. 1.** Зависимость величины отклонения траектории трещины от отношения длин разделяемых частей проката при  $l_1''/l_1' = 0.15$  (1), 1.0 (2), 1.2 (3); — — сталь ШХ15, - - - — сталь 45

**Рис. 2.** Зависимость величины отклонения траектории трещины от отношения длин недеформируемой части заготовки и плеча изгибающей нагрузки при  $l_1' = l_2' = 35$  (1),  $l_1' = l_2' = 50$  (2)

Для стали 45 при плече изгибающей нагрузки 35 mm оптимум отклонения трещины находится при отношении длины недеформируемой части заготовки к плечу изгибающей нагрузки, равном 0.9, а для плеча 50 mm он равен 0.8 mm.

Отклонение траектории трещины при отношении длины недеформируемой части заготовки к плечу изгибающей нагрузки  $l_1''/l_1' < 1$  не наблюдалось примерно до  $2/3$  диаметра заготовки, но в конце сечения оно составляло величину, примерно равную 4.0–5.0 mm. Причем такой характер отклонения траектории трещины характерен для различной формы поперечного сечения проката.

При указанных параметрах плеч приложения нагрузки и длин недеформируемой части заготовки запись траектории движения отделяемых частей проводили методом деформационного отпечатка на медную прокладку, размещенную в зоне надреза. Для исследуемых параметров отпечатки траектории движения отделяемых частей были симметричны относительно надреза.

Запись траектории движения вновь образовавшихся поверхностей производили для всех исследуемых параметров длин проката. При отношении разделяемых длин  $l_1/l_2 = 10$  и отношении длины недеформируемой части заготовки к плечу изгибающей нагрузки  $l_1''/l_1' = 0.15$  запись траектории имеет прерывистый несимметричный характер относительно концентратора напряжений (рис. 3,а). По записи установлено, что разделяемые части имеют равные траектории. В результате разрушения заготовки на медной проклад-

ке наблюдался отпечаток рельефа траектории движения разделяемых частей. Видны четко очерченные ступеньки, причем ступеньки, образуемые короткой отделяемой частью, в 2 раза длиннее, чем образуемые длинной частью.

При тех же параметрах, что и в рассмотренном случае, но при отношении  $l_1''/l_1' = 1.0$  рисунок рельефа на медной прокладке выглядит иначе (рис. 3,б). Как и в первом случае, отпечатки траектории движения имеют различие, но менее выраженное. Зона рисунка траектории движения короткой отделяемой части на медной прокладке уменьшилась по длине вдвое по сравнению с зоной записи длинной части.

Измерение отклонения поверхности разрушения от заданной плоскости показывает, что путь, пройденный трещиной от места старта без изменения траектории трещины, равняется примерно  $(3/4)D$ , далее наблюдается отклонение траектории трещины в виде козырька ( $\delta = 1.5 \text{ mm}$ ). По данной записи можно судить о том, что разделяемые части в момент разрыва сплошности приобретают приблизительно одинаковые скорость и ускорение.

Изменение отношения  $l_1''/l_1'$  до значения 1.2 при тех же параметрах процесса ломки привело к стабилизации процесса разрушения. На рис. 3,в показана медная прокладка, на которой видны равные зоны рельефа отпечатка.

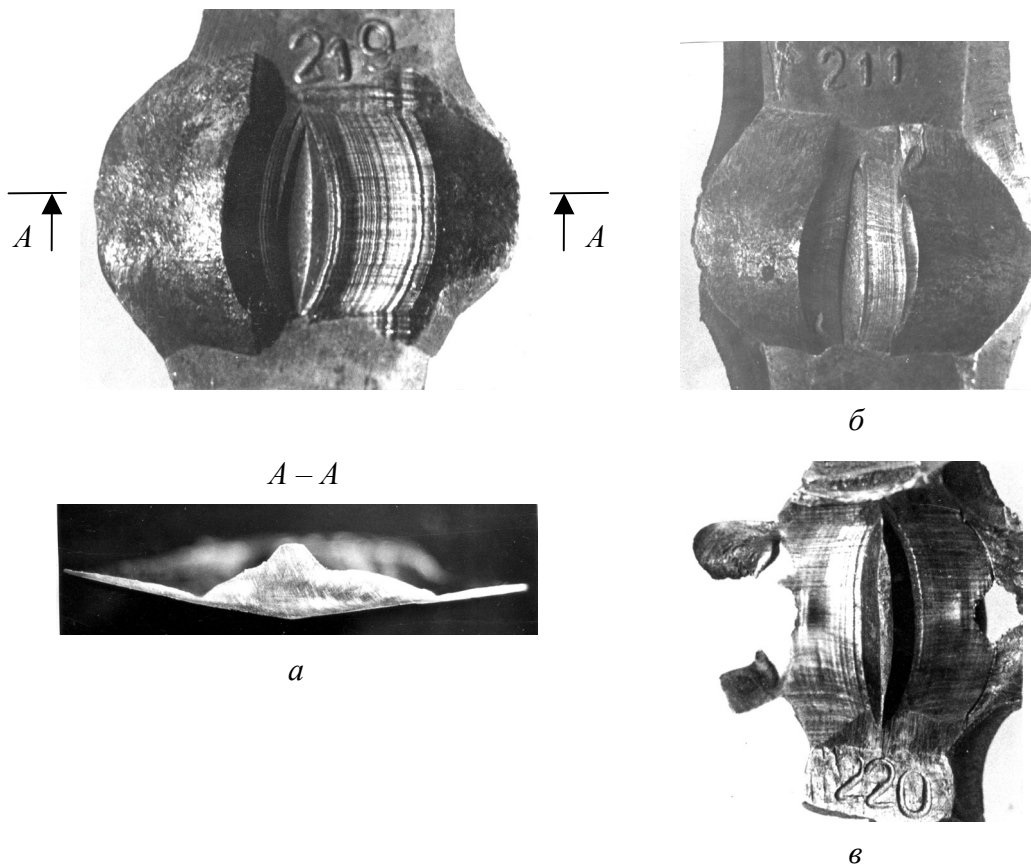


Рис. 3. Медная прокладка с отпечатком рельефа траектории движения разделяемых частей при: а –  $l_1/l_2 = 10$  и  $l_1''/l_1' = 0.15$ ; б –  $l_1/l_2 = 10$  и  $l_1''/l_1' = 1.0$ ; в –  $l_1/l_2 = 10$  и  $l_1''/l_1' = 1.2$

Изменение отношения  $l_2/l_1 = 3$  при  $l_1''/l_1' = 0.15$  не изменило картину записи. Со стороны короткой части наблюдается четко очерченная резкими ступеньками широкая зона деформации медной прокладки, которая примерно в 2 раза по длине превышает зону записи длинного конца заготовки. Записи рельефа на медной прокладке соответствуют рис. 3,а. Таким образом, уменьшение отношения длины проката в заготовке ( $l_2/l_1 = 3$ ) качественно не меняет картину поверхности излома.

При ломке образцов пополам, когда  $l_2/l_1 = 1$ , при отношении  $l_1''/l_1' = 0.15$  отпечаток рельефа соответствует изображенному на рис. 3,в. Аналогичный отпечаток рельефа наблюдается также для  $l_2/l_1 = 1$  и  $l_1''/l_1' = 1.2$ .

Особенностью установленного характера разрушения является то, что на отклонение траектории трещины оказывает влияние длина заготовки и плечо приложения нагрузки. Причем наименьшее отклонение трещины от плоскости надреза наблюдается при длине заготовки, примерно равной  $2D$  и более, и плече приложения нагрузки, примерно равном  $D$ . Для указанных параметров запись рельефа траектории отпечатка имела симметричный вид.

При длине заготовки, меньшей  $2D$ , и плече приложения изгибающей нагрузки, равном  $D$ , отпечаток траекторий отделяемых частей имеет несимметричный вид. Трещина при данных параметрах отклоняется от прямолинейности до 5 мм.

Полученные результаты с достаточной для инженерной практики точностью совпадают с результатами теоретических исследований [4]. Сложность точного теоретического описания процесса ломки проката на неравные части предопределила построение эмпирической зависимости, которая показывает, что отклонение траектории трещины  $\delta_l$  связано с отношением  $l_1''/l_1'$  следующим уравнением:

$$\delta_l = \frac{1}{2} \left[ 13.9 \left( \frac{l_1''}{l_1'} - a \right) - 2.5 \right] - \frac{1}{2} \left[ 13.9 \left( \frac{l_1''}{l_1'} - a \right) + 2.5 \right] + c,$$

где  $a$  и  $c$  – коэффициенты, зависящие соответственно от пластичности стали и плеча приложения изгибающей нагрузки ( $a = 0.6-0.93$ ,  $c = 2.7-3.0$ ). Большие значения коэффициентов характерны для хрупкой стали и малых плеч приложения изгибающих нагрузок.

### Выводы

Таким образом, установлено, что при симметричном нагружении трехточечным изгибом на перераспределение напряжений относительно заданной плоскости разрушения в процессе развития трещины оказывает влияние сила инерционного сопротивления в недеформируемых отделяемых частях проката. Достаточным условием для стабилизации траектории трещины при отделении хрупкого проката изгибом от длинных штанг является обеспечение отношения длины недеформируемой части  $l_1''$  к плечу приложения изги-

бающей нагрузки  $l_1'$  больше 0.8–1.2 высоты сечения проката или ломка проката пополам. Для заготовок, равных по длине двум диаметрам и более, с длиной плеча приложения нагрузки, равной диаметру, трещина не отклоняется от плоскости надреза. Для заготовок, по длине меньших двух диаметров, трещина отклоняется на значительную величину.

1. П. Кросли, Э. Риплинг, *Механика разрушения* № 25, 74 (1981).
2. В.М. Финкель, Ю.И. Головин, Г.Б. Родюков, *Холодная ломка проката*, Металлургия, Москва (1982).
3. Л.С. Мороз, *Механика и физика деформаций и разрушения материалов*, Машиностроение, Ленинград (1984).
4. Т. Екобори, *Физика и механика разрушения и прочность твердых тел*, Металлургия, Москва (1971).

*E.N. Vysotsky*

#### INTERRELATION BETWEEN THE RATIO OF LENGTHS OF DIVIDED ROLLED PRODUCT PARTS AND SURFACE QUALITY

At the division of rolled products by the scheme of three point bending a deviation of crack trajectory is shown to be influenced by the ratio of the length of undeformed part to that of shoulder of bending load application  $l_1''/l_1'$ . The least deviation from the plane of notching is observed for  $l_1''/l_1' \geq 1$ .

**Fig. 1.** Dependence of the value of crack trajectory deviation on ratio of lengths of divided rolled products for  $l_1''/l_1' = 0.15$  (1), 1.0 (2), 1.2 (3); — — steel ШХ15, - - - - steel 45

**Fig. 2.** Dependence of the value of crack trajectory deviation on ratio of lengths of undeformed part of billet and bending load arm for  $l_1' = l_2' = 35$  (1),  $l_1' = l_2' = 50$  (2)

**Fig. 3.** Copper spacer with printed relief of the trajectory of separated part motion for :  $a - l_1/l_2 = 10$  and  $l_1''/l_1' = 0.15$ ;  $b - l_1/l_2 = 10$  and  $l_1''/l_1' = 1.0$ ;  $c - l_1/l_2 = 10$  and  $l_1''/l_1' = 1.2$