

PACS: 81.40.Np

Е.Н. Высоцкий

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ,  
ПОЛУЧЕННОГО РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ,  
ПРИ ЛОМКЕ ПРОКАТА ИЗГИБОМ

Институт физики горных процессов НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2005 года

*Изучено влияние концентратора напряжений, полученного различными способами (вдавливанием в прокат ножа треугольной формы, проточкой сегментных и круговых надрезов, местным электроконтактным оплавлением поверхности проката и электроэрозионным прожиганием узких щелей) на усилие разделения проката изгибом и стабилизацию траектории трещины. Проведенные исследования и анализ полученных данных показали, что наиболее эффективный концентратор образуется в результате электроконтактного оплавления при силе тока 200–300 А и электроэрозионном прожигании при ширине прорези 0.1 мм. Способ внедрения ножа и резания с оптимальными параметрами надреза обеспечивает также минимальное отклонение траектории трещины. Для практической реализации способ внедрения ножа представляет больший интерес, поскольку он хорошо комбинируется в установках для разделения проката изгибом.*

### Введение

Задача качественного разделения проката изгибом сводится к созданию такого напряженного состояния относительно заданной плоскости разделения, которое бы однозначно определяло траекторию трещины на всей трассе ее следования. Причины, дестабилизирующие траекторию трещины при разделении проката изгибом без наложения дополнительного поля сжимающих напряжений, до настоящего времени не установлены. С целью вскрытия этих причин в работе [1] проведен анализ различных схем разделения проката изгибом при симметричном и асимметричном нагружении. В результате автор недостаточно обоснованно утверждает, что в момент старта трещины внешние изгибающие нагрузки автоматически снимаются и дальнейшее продвижение трещины определяется условиями энергообмена между разрушаемыми и деформируемыми зонами. При этом прилегающие к поверхности трещины зоны нагружаются дополнительными касательными напряжениями, величина которых зависит от условий нагружения и скорости разгрузки деформируемых слоев металла.

Дополнительные касательные напряжения, возникающие от волн разгрузки, по мнению автора [1], и определяют характер траектории трещины. Такое представление механики процесса разрушения находится в глубоком противоречии с известными работами [2,3], в которых показано, что при достижении трещиной большей скорости происходит ветвление, в результате чего трещина меняет свое направление.

### Материал и методика эксперимента

Поиск наиболее рациональных способов получения концентратора напряжений и оптимизации его параметров осуществляли путем исследования ряда технологически приемлемых методов обработки металлов, таких как: вдавливание в прокат ножа треугольной формы, проточка сегментных и круговых надрезов, местное электроконтактное оплавление поверхности проката и электроэрозионное прожигание узких щелей. Для устранения влияния инерционных нагрузок производили ломку образцов на равные части.

Экспериментальную проверку по работе разрушения реальных материалов осуществляли на гидравлическом прессе модели Д 2430В усилием 1.0 MN. В качестве исследуемого материала применяли стали 45 и ШХ15 диаметром 33 mm. При выборе способа нанесения концентратора напряжений и оптимальных его параметров руководствовались причиной изменения характера разрушения образцов, вызванной резкой локализацией пластической деформации за счет повышения объемности напряженного состояния [4].

### Результаты эксперимента и их обсуждение

На первом этапе исследовали влияние концентратора, полученного вдавливанием клиновидного ножа, и его параметров (глубина внедрения ножа, угол и радиус при вершине), а также твердости материала на усилие ломки и отклонение траектории трещины. Для этого мерные заготовки диаметром 33 mm, длиной 100 mm из стали 45 твердостью HB250 и стали ШХ15 твердостью HB370 и HB230 предварительно надрезали призматическим ножом. Угол профиля надреза 30 и 60°, глубина внедрения ножа для стали 45 – 1.5; 3.0; 6.0 mm, для стали ШХ15 – 1.5; 2.5; 4.0 mm, радиус при вершине – 0.1; 0.25; 0.5 mm (рис. 1).

В результате обработки экспериментальных данных выведена эмпирическая зависимость усилия внедрения ножа от исследуемых параметров

$$P_{\text{ins}} = \Delta H \sqrt[6]{r} (0.0004\alpha + 0.013) \text{HB}, \quad (1)$$

где  $\Delta H$ ,  $\alpha$  и  $r$  – соответственно глубина, угол раскрытия и радиус надреза.

Из эмпирической зависимости видно, что на усилие внедрения оказывают влияние все исследуемые параметры. Определяющими являются глубина и угол раскрытия надреза. Изучение прочности и стойкости ножей, изготовленных из стали ЭП761 с твердостью HRC60 показало, что для сталей 45 и ШХ15 с твердостью HB250 наиболее оптимальными по стойкости являются

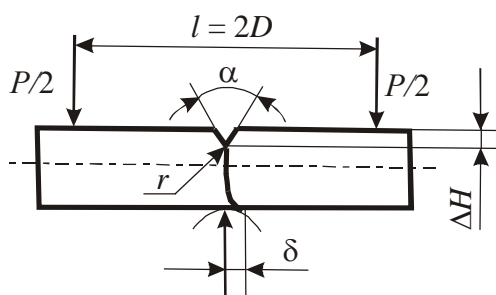


Рис. 1. Схема получения концентратора напряжений вдавливанием ножа

параметры ножа: угол 60–90° и радиус при вершине 0.1 mm при 2060 циклах; для стали ШХ15 твердостью НВ370 – угол 90° и радиус при вершине 0.1 mm при 320–350 циклах. Ножи с углами 30 и 60° при нанесении надрезов на стали ШХ15 с твердостью НВ370 имеют низкие прочностные характеристики. Нож с углом 30° разрушался при одном нагружении, а на ноже с углом 60° наблюдался скол при 40–60 циклах. Для ножа с углом 120° наблюдался износ по радиусу до 0.3 mm при 120–130 циклах.

Таким образом, результаты исследования показали, что для материалов, подвергающихся разделению, с твердостью НВ250 можно рекомендовать клиновидный нож с углами 60–90°, для материалов с твердостью НВ370 – нож с углом 90°.

Исходя из экспериментальных данных, величины отклонения траектории трещины  $\delta$  и усилия ломки  $P$  зависят от глубины  $\Delta H$  (рис. 2) и угла надреза  $\alpha$  (рис. 3). Наибольшее отклонение траектории трещины  $\delta$  характерно для надреза с параметрами  $r = 0.5$  mm;  $\alpha = 60\text{--}90^\circ$ ;  $\Delta H = 1.0\text{--}6.0$  mm. Увеличение глубины надреза незначительно повышает качество поверхности разрушения, так как минимальное отклонение трещины для  $\Delta H = 6$  mm составляет 1.3 mm. Усилие ломки для указанных параметров  $P \approx 0.32$  MN, поверхность излома характеризуется наличием глубоких рубцов и ступенек со стороны опоры (рис. 4,а).

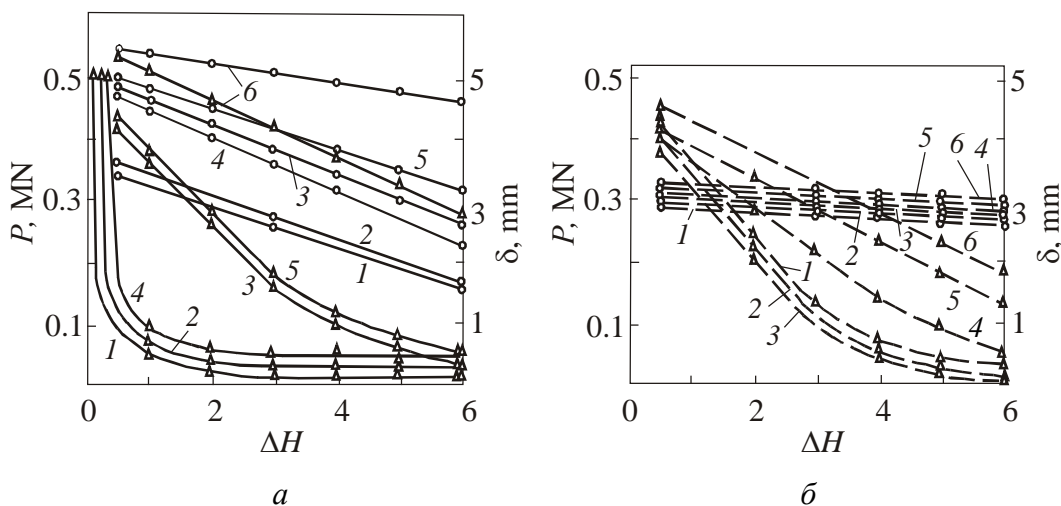
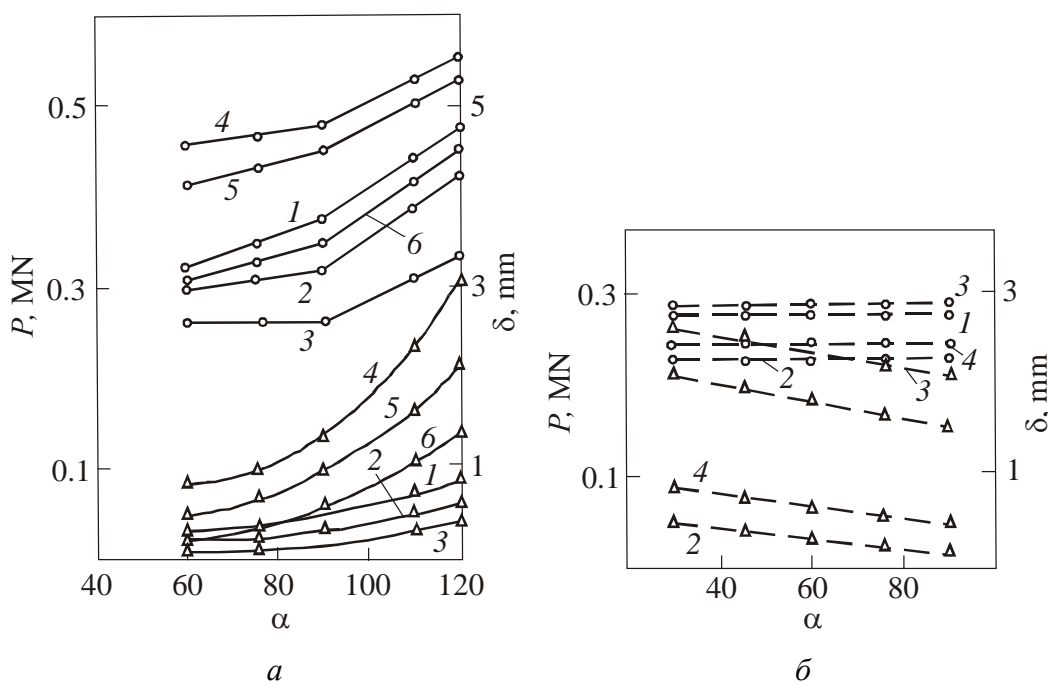


Рис. 2. Зависимость усилия ломки  $P$  (—○—) и величины отклонения траектории трещины  $\delta$  (—△—) от глубины надреза: а – сталь ШХ15: при  $r = 0.1$  mm 1 –  $\alpha = 60^\circ$ , 2 –  $90^\circ$ , 3 –  $120^\circ$ ; при  $r = 0.5$  mm 4 –  $\alpha = 60^\circ$ , 5 –  $90^\circ$ , 6 –  $120^\circ$ ; б – сталь 45: при  $r = 0.1$  mm 1 –  $\alpha = 30^\circ$ , 2 –  $60^\circ$ , 3 –  $90^\circ$ ; при  $r = 0.5$  mm 4 –  $\alpha = 30^\circ$ , 5 –  $60^\circ$ , 6 –  $90^\circ$

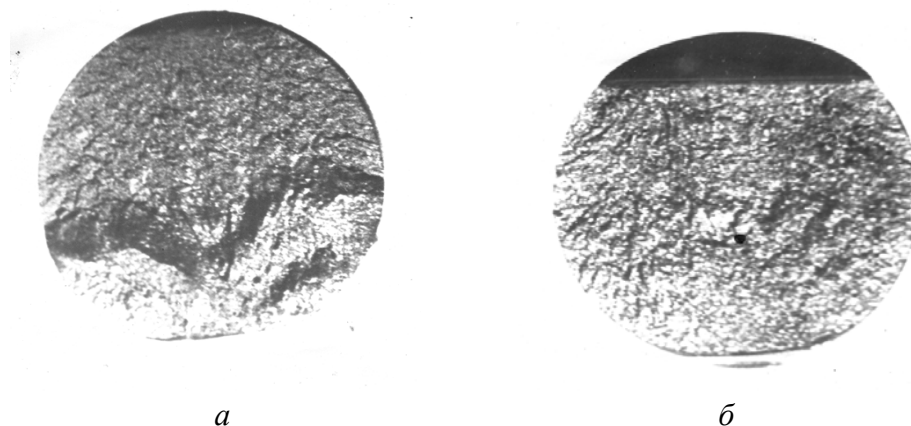


**Рис. 3.** Зависимость усилия ломки  $P$  (—○—) и величины отклонения траектории трещины  $\delta$  (—△—) от угла концентратора: *a* – сталь ШХ15: при  $r = 0.1$  mm 1 –  $\Delta H = 1.3$  mm, 2 – 2.3 mm, 3 – 4.4 mm; при  $r = 0.5$  mm 4 –  $\Delta H = 1.3$  mm, 5 – 2.3 mm, 6 – 4.4 mm; *б* – сталь 45: при  $r = 0.1$  mm 1 –  $\Delta H = 3.0$  mm, 2 – 6.0 mm; при  $r = 0.5$  mm 3 – 3.0 mm, 4 – 6.0 mm

Оптимальными параметрами концентратора напряжений для стали 45, как видно из графиков, являются  $r = 0.1\text{--}0.25$  mm,  $\alpha = 60\text{--}90^\circ$ ,  $\Delta H = 4\text{--}6$  mm. При уменьшении глубины надреза, начиная с  $\Delta H = 4$  mm, наблюдается резкое снижение качества поверхности разделения, которое выражается в увеличении  $\delta$  до большого значения, в десятки раз превышающего допустимое. Поверхность излома при малых глубинах концентратора от 1 до 4 mm подобна поверхности излома, полученной при больших радиусах ( $r = 0.5$  mm). Излом при оптимальных параметрах (рис. 4,б) характеризуется наличием мелких рубцов и ступенек, не превышающих по величине 0.3 mm.

Таким образом, для стали 45 увеличение радиуса надреза более 0.25 mm и уменьшение глубины надреза от 4 mm характеризуются низким качеством поверхности разделения. Углы оказывают меньшее влияние на величину отклонения трещины от плоскости разделения, чем глубина концентратора и радиус. Усилие ломки при определенных параметрах концентратора напряжений составляет минимальное значение.

Для стали ШХ15 наибольшее отклонение трещины наблюдалось для концентратора, имеющего параметры:  $r = 0.5$  mm,  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\Delta H = 1\text{--}5$  mm, причем угол надреза  $120^\circ$  дает положительный эффект только при относительно большой глубине концентратора напряжений и радиусе при вершине 0.1 mm. Усилие ломки для указанных параметров составляет максимальную величину. Наиболее оптимальными для ломки параметрами концентратора напряжений



**Рис. 4.** Поверхность излома стали 45: *a* –  $r = 0.5$  mm,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\Delta H = 1.7$  mm; *б* –  $r = 0.1$  mm,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\Delta H = 6.0$  mm

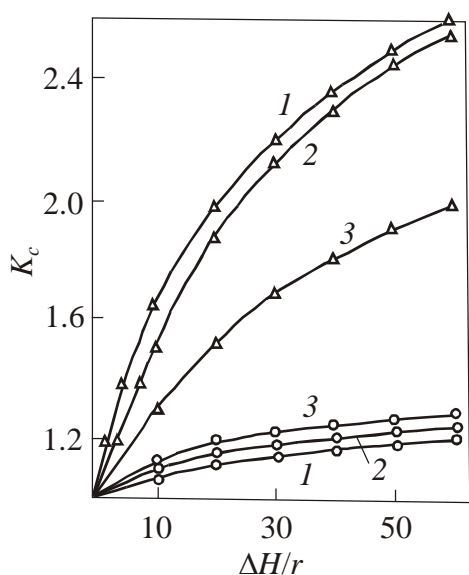
для стали ШХ15 являются:  $r = 0.1\text{--}0.25$  mm,  $\alpha = 60\text{--}90^\circ$ ,  $\Delta H = 2\text{--}5$  mm. Причем с ростом глубины концентратора напряжений, начиная с 2 mm, величина отклонения траектории трещины от плоскости разрушения остается практически постоянной и колеблется в пределах  $\delta = \pm 0.3$  mm. Поверхность излома при оптимальных параметрах характеризуется наличием малых по величине и площади рубцов и ступенек. Анализ исследуемых параметров показал, что величина отклонения траектории трещины при разрушении с концентратором, образованным клиновидным ножом, связана с радиусом, глубиной и углом надреза следующей эмпирической зависимостью:

$$\delta_c = \left( \frac{\sqrt[4]{r}}{\Delta H} + 0.001\alpha^2 - 0.13\alpha + 4 \right) K_m, \quad (2)$$

где  $K_m$  – коэффициент концентрации исследуемого материала, зависящий от пластичности сталей (для хрупких сталей имеет меньшие значения). Для стали ШХ15  $K_m = 0.65\text{--}0.85$ , для стали 45  $K_m = 1.25\text{--}1.35$ . Большие значения коэффициента используются для больших сечений, меньшие – для малых. Значения вычисленных коэффициентов определяли из условий реальных величин усилий ломки, полученных для исследуемых параметров надреза вдавливанием клиновидного ножа.

Таким образом, для симметрично нагруженного образца с равными разделяемыми длинами качество поверхности разрушения зависит от глубины концентратора и радиуса при вершине. Угол надреза на качество поверхности разделения большого влияния не оказывает.

Экспериментальные данные позволяют построить графическую зависимость коэффициента концентрации напряжений при различных отношениях глубины надреза к радиусу на дне надреза при исследуемых углах раскрытия последнего. При построении графической зависимости коэффициент концентрации определяли из отношения величины максимальной нагрузки



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента концентрации напряжений  $K_c$  от отношения глубины надреза к радиусу  $\Delta H/r$  для стали 45 (—○—) с углами  $\alpha = 30^\circ$  (1),  $60^\circ$  (2),  $90^\circ$  (3) и стали ШХ15 (—△—) с углами  $\alpha = 60^\circ$  (1),  $90^\circ$  (2),  $120^\circ$  (3)

уровень, с ростом угла от 30 до 90° (кривые 2 и 3) наблюдается незначительное повышение этого коэффициента. Последнее, по-видимому, связано с более высоким упрочнением зоны концентратора.

Анализ исследуемых параметров надреза, получаемого методом внедрения клиновидного ножа, показал, что коэффициент концентрации напряжений связан с радиусом, глубиной, углом надреза и твердостью разделяемых материалов следующей эмпирической зависимостью:

$$K_c = \sqrt[n]{\frac{\Delta H}{r}}, \quad (3)$$

где  $n$  – показатель степени (4–15), зависящий от твердости и угла раскрытия надреза (для хрупких сталей  $n$  имеет меньшие значения).

Формула усилия ломки с учетом коэффициента концентрации примет вид

$$P = 0.4 \frac{\sigma_b D_0^3}{l_0} \frac{1}{K_c}. \quad (4)$$

Проведенные исследования и анализ полученных результатов показали, что способ внедрения ножа при параметрах надреза: угле 60–90°, радиусе 0.1–0.25 mm и глубине, равной 6–15% сечения проката, обеспечивает стабильную поверхность разрушения, где отклонение траектории трещины не превышает 0.3–0.5 mm.

для образцов без надреза к величине максимальной нагрузки для образцов с надрезами. Из графика (рис. 5) видно, что коэффициент концентрации напряжений для стали ШХ15 выше, чем для стали 45. Причем при больших отношениях и углах раскрытия надреза от 60 и 90° (кривые 1 и 2) наблюдается высокая концентрация напряжений, при угле 120° (кривая 3) концентрация напряжений резко падает.

Для стали 45 значение коэффициента концентрации напряжений гораздо меньше по сравнению со сталью ШХ15. Причем с ростом отношения  $\Delta H/r$  коэффициент концентрации для исследуемых параметров надреза растет очень медленно, уменьшение угла раскрытия надреза еще в большей степени снижает коэффициент концентрации. При угле 30° (кривая 1) коэффициент концентрации имеет самый низкий

Для исследования концентратора, образованного резанием, на мерных заготовках резцом наносили круговой и сегментный надрезы с углом профиля 60 и 90°, радиусом на дне надреза  $r = 0.1-0.5$  mm и глубиной  $\Delta H = 1-6$  mm.

Ломку заготовок производили в несколько этапов. Сначала разрушали образцы с сегментными и круговыми надрезами с радиусом при вершине  $r = 0.1$  mm, углом раскрытия надреза  $\alpha = 60$  и 90° при глубине  $\Delta H = 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 4; 5; 6$  mm. Те же исследования были проведены для радиуса на дне надреза  $r = 0.25$  и 0.5 mm.

Анализ и обработка экспериментальных данных по влиянию кругового и сегментного надрезов на характер разрушения и сравнение этих результатов с результатами, полученными при ломке заготовок с концентратором, образованным вдавливанием ножа, показали, что данные концентраторы имеют примерно одни и те же значения по усилию ломки и качеству поверхности разрушения. Для стали ШХ15 с твердостью HB370 усилие ломки для кругового концентратора уменьшается на 3–8% по отношению к сегментному концентратору и концентратору, образованному вдавливанием ножа. Качество поверхности разрушения с круговым концентратором также повышается незначительно.

Исследования концентратора, полученного электроконтактным методом, проводили в зоне концентратора с помощью металлографии. С этой целью на образцах из стали ШХ15 в месте предполагаемого разрушения электро-

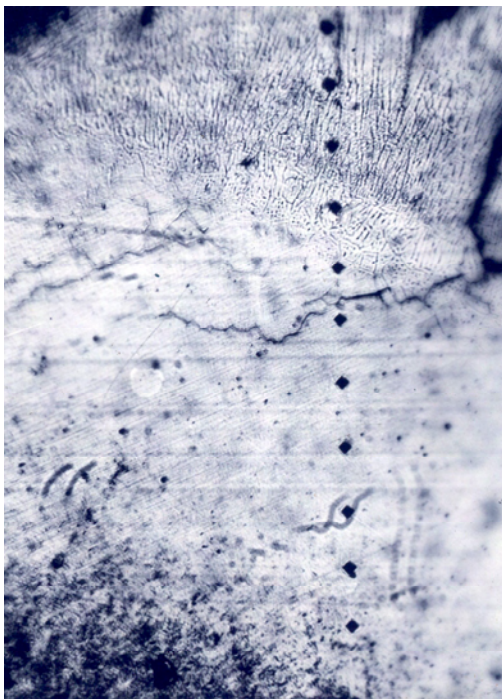


Рис. 6. Микроструктура зоны концентратора при электроконтактном оплавлении,  $\times 120$

дом производили электроконтактное оплавление при силе тока до 500 А. В зоне образования электрической дуги в поперечном направлении вырезали шлиф, на котором исследовали изменение структурного состояния под воздействием электрической дуги. Изучение зоны термического влияния проводили на металлографическом микроскопе при 120-кратном увеличении. Микроструктура зоны термического влияния неоднородна (рис. 6). Непосредственно в месте контакта электрической дуги с металлом проката структура характеризуется трещинами и раковинами. По структурному состоянию это крупноигольчатый мартенсит. За этой зоной следует зона белого слоя, т.е. бесструктурный мартенсит с высокой твердостью, затем – зона отпуска и дальше – структура основного материала. Различное

структурное состояние в зоне воздействия электрической дуги подтверждается и различной микротвердостью, измерение которой проводили на микротвердомере при нагрузке 1 N. Таким образом, термический концентратор создает различное структурное состояние, макро- и микротрещины, которые и обеспечивают высокую концентрацию напряжений в процессе разрушения.

Ломка образца с концентратором, полученным электроконтактным оплавлением при различных значениях импульсов тока, показала, что основным фактором, определяющим качество поверхности разрушения, является мощность импульса тока, который определяет локальную зону изменения структуры металла, обуславливая резкую концентрацию напряжений. Поверхности изломов при концентраторе напряжений, полученном электроконтактным способом, отличаются от поверхности изломов при концентраторах, полученных вдавливанием ножа, более гладким рельефом. Практически отсутствуют рубцы и ступеньки. Коэффициент концентратора напряжений для электроконтактного способа имеет более высокие значения по отношению к способу внедрения ножа ( $K_c = 1.5-3.4$ ). Для хрупких сталей  $K_c$  имеет большие значения.

Таким образом, электроконтактный способ получения концентратора напряжений по отношению к способу внедрением ножа характеризуется повышенной концентрацией напряжения и более высоким качеством поверхности разрушения ( $\delta = 0.2$  mm).

Исследовали также концентратор, изготовленный электроэрозионным методом, который выполняли в виде узких щелей шириной 0.1 mm, глубиной 1–5 mm. Надрез наносили электроэрозионным способом с помощью тонкой медной пластинки толщиной 0.1 mm. Ломка заготовок с концентратором, полученным таким способом, значительно снизила усилие ломки при меньшей глубине надреза в сравнении со способом внедрения ножа. Коэффициент концентрации напряжений при электроэрозионном способе имеет более высокие значения:  $K_c = 1.2-4.0$  (большие значения соответствуют хрупким сталям).

Таким образом, очевидно, что электроэрозионный способ получения концентратора напряжений обеспечивает минимальное отклонение траектории трещины по сравнению со способом внедрения ножа и резанием. Усилие ломки по сравнению со способом внедрения ножа падает на 20–30%.

### Выводы

Анализ способа получения концентратора напряжений показал, что способы внедрения ножа и резания обеспечивают примерно одинаковое качество поверхности разделения, усилия ломки для данных способов также практически не имеют различий. Электроконтактный способ получения концентратора напряжений отличается от способа внедрения ножа, резания и электроэрозионного прожигания своими параметрами. Если для способа получения концентратора методом внедрения ножа или резания основными пара-



метрами являются радиус и глубина надреза, то электроконтактный способ, практически не изменяя форму надреза, изменяет структуру металла, образуя при этом большое количество макро- и микротрещин, которые определяют высокую концентрацию напряжений. Это меняет характер поверхности разрушения в сторону повышения качества поверхности и снижения усилия ломки. Электроэрозионный концентратор имеет форму узкой щели, приближающейся к трещине, поэтому концентрация напряжений достигает наибольших значений.

Проведенные исследования и анализ полученных данных показали, что наиболее эффективный концентратор образуется в результате электроконтактного оплавления при силе тока 200–300 А и электроэрозионном прожигании при ширине прорези 0.1 мм. Способ внедрения ножа и резания с параметрами надреза: углом 60–90°, радиусом 0.1–0.25 мм и глубиной, равной 6–15% сечения проката, обеспечивает минимальное отклонение траектории трещины.

Металлографические исследования зоны концентратора показали, что при электроконтактном оплавлении образуется много макро- и микротрещин, которые обуславливают рост коэффициента концентрации напряжений перед разрушением. При выполнении надреза вдавливанием ножа и резанием трещин не образуется, что снижает величину коэффициента концентрации напряжений. Но для практической реализации способ внедрения ножа представляет большой интерес, так как он хорошо komponуется в установках для разделения проката изгибом.

1. В.И. Косяк, Проблемы прочности № 2, 100 (1981).
2. П. Кросли, Э. Риплинг, в сб.: Механика разрушения. (Быстрое разрушение, установка трещин), Мир, Москва (1981), № 25, с. 74–100.
3. В.М. Финкель, Физические основы торможения разрушения, Metallurgy, Москва (1977).
4. Е.Н. Высоцкий, В.И. Косяк, КШП № 11, 45 (1977).

*E.N. Vysotsky*

## RESEARCH OF STRESS CONCENTRATOR, GOT BY DIFFERENT WAYS, AT BREAKING OF ROLLED METAL BY BENDING

Influence of the stress concentrator on separation force of the rolled metal bending and crack path was investigated using the concentrators prepared by the different methods: indentation of the triangular blade into rolled metal; turning of the segmented and circular notches; local electrocontact melting of the rolled metal surface; electroerosion burning of narrow slots. The analysis of the investigation data showed that the most effective concentrator forms as a result of the electrocontact flash at 200–300 A current strength, as well as electroerosion burning with 0.1 mm slot width. The method of blade insertion and cutting with notch optimal parameters ensures the minimal crack path deflection. The

method of the blade indentation is of a great interest since it is arranged well enough into the facility for the rolled metal separation.

**Fig. 1.** A scheme of stress concentrator initiation by pressing a knife

**Fig. 2.** Dependence of crushing force  $P$  (—○—) and value of crack trajectory deviation  $\delta$  (—△—) on cut depth:  $a$  – steel ШХ15: for  $r = 0.1$  mm 1 –  $\alpha = 60^\circ$ , 2 –  $90^\circ$ , 3 –  $120^\circ$ ; for  $r = 0.5$  mm 4 –  $\alpha = 60^\circ$ , 5 –  $90^\circ$ , 6 –  $120^\circ$ ;  $b$  – steel 45: for  $r = 0.1$  mm 1 –  $\alpha = 30^\circ$ , 2 –  $60^\circ$ , 3 –  $90^\circ$ ; for  $r = 0.5$  mm 4 –  $\alpha = 30^\circ$ , 5 –  $60^\circ$ , 6 –  $90^\circ$

**Fig. 3.** Dependence of crushing force  $P$  (—○—) and value of crack trajectory deviation  $\delta$  (—△—) on concentrator angle:  $a$  – steel ШХ15: for  $r = 0.1$  mm 1 –  $\Delta H = 1.3$  mm, 2 – 2.3 mm, 3 – 4.4 mm; for  $r = 0.5$  mm 4 –  $\Delta H = 1.3$  mm, 5 – 2.3 mm, 6 – 4.4 mm;  $b$  – steel 45: for  $r = 0.1$  mm 1 –  $\Delta H = 3.0$  mm, 2 – 6.0 mm; for  $r = 0.5$  mm 3 –  $\Delta H = 3.0$  mm, 4 – 6.0 mm

**Fig. 4.** Surface of steel 45 fracture:  $a$  –  $r = 0.5$  mm,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\Delta H = 1.7$  mm;  $b$  –  $r = 0.1$  mm,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\Delta H = 6.0$  mm

**Fig. 5.** Dependence of stress concentration factor  $K_c$  on the ratio of cut depth and radius  $\Delta H/r$  for steel 45 (—○—) with angles  $\alpha = 30^\circ$  (1),  $60^\circ$  (2),  $90^\circ$  (3) and steel ШХ15 (—△—) with angles  $\alpha = 60^\circ$  (1),  $90^\circ$  (2),  $120^\circ$  (3)

**Fig. 6.** Microstructure of concentrator zone under electric-contact fusion,  $\times 120$