

УДК 621.791.76/79  
М 75

## О ПРИЧИНАХ РАЗРУШЕНИЯ ЗВЕНЬЕВ ЯКОРНЫХ ЦЕПЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНО-СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ

А. В. Молтасов, мл. науч. сотр.;

С. М. Самотрасов, зам. зав. отд.;

П. Н. Четверо, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев*

**Аннотация.** Проведено теоретическое исследование пластического изгиба на большую кривизну прутка круглого сечения. Решена задача теории пластичности, получены аналитические зависимости радиальных и тангенциальных напряжений от текущего радиуса кривизны в сечении прутка с учетом упрочнения. Для материала сталь 25 построена эпюра остаточных напряжений в сечении прутка.

**Ключевые слова:** звено якорной цепи, контактно-стыковая сварка, пластический изгиб, остаточные напряжения.

**Анотація.** Проведено теоретичне дослідження пластичного згину на велику кривизну прутка круглого перерізу. Розв'язано задачу теорії пластичності, отримано аналітичні залежності радіальних та тангенціальних напружень від змінного радіуса кривизни в перерізі прутка з урахуванням зміцнення. Для матеріалу сталь 25 побудовано епюру залишкових напружень у перерізі прутка.

**Ключові слова:** ланка якорного ланцюга, контактно-стикове зварювання, пластичний згин, залишкові напруження.

**Abstract.** Theoretical test of plastic bending for the large curvature of the bar with a round cross-section was conducted. The problem of the plasticity theory was solved, the analytical dependences of the radial and tangential stress on the alternating radius of curvature in the bar cross-section with hardening were found. The residual stresses diagram in the bar cross-section was built for the Steel25 material.

**Keywords:** anchor chain link, butt welding, plastic bending, residual stress.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Расчет напряжений, возникающих в процессе контактно-стыковой сварки звена цепи, показал, что в местах образования трещины (точка *A* или *B* на рис. 1) напряжения, которые возникают от приложенной нагрузки, намного меньше предела текучести. Поэтому авторами настоящей статьи было выдвинуто предположение, что разрушение происходит из-за высоких остаточных напряжений растяжения на внутренней поверхности звена, которые возникают при изгибе.

Первый конец прутка загибается в горячем состоянии  $T \approx 700$  °С, при этом остаточные напряжения пренебрежимо малы по сравнению с пределом прочности материала в холодном состоянии. Но по мере проведения операций в гибочной машине образец остывает и второй конец прутка загибается при температуре  $T \approx 400$  °С, при этом могут возникать остаточные напряжения, соизмеримые с пределом прочности материала в холодном состоянии.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Исследованию пластического изгиба посвящены работы Е. Н. Мошнина [5], М. Е. Сторожева [10] и М. Е. Зубцова [1]. В этих работах проводится подробное исследование пластического изгиба листов (широких полос) при больших деформациях. Также

отмечается, что напряженно-деформированное состояние при изгибе широких и узких полос коренным образом отличается. Для широких полос имеет место плоская деформация, а для узких — плоское напряженное состояние. Очевидно, что условия пластичности для этих двух случаев будут отличаться. Здесь необходимо отметить, что напряженное состояние при изгибе круглого прутка соответствует напряженному состоянию узкой полосы, поэтому результаты, полученные для изгиба широких полос, в нашем случае использовать нельзя.

В случае отсутствия упрочнения задачу изгиба узкой полосы, изменив граничные условия, можно свести к задаче о плоском кольце, решенной в [6] с использованием условия пластичности Хубера–Мизеса, но при наличии упрочнения, описанный в этой работе подход не может быть использован.

В данной статье рассмотрен изгиб с упрочнением круглого прутка на большую кривизну с использованием условия пластичности Треска–Сен-Венана.

**ЦЕЛЮЮ СТАТЬИ** является определение остаточных напряжений в местах зарождения трещин, которые возникают при контактно-стыковой сварке звеньев якорных цепей.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Деформирование заготовки происходит при поперечном изгибе (схема нагружения изображена на рис. 2), то есть в сечениях заготовки одновременно

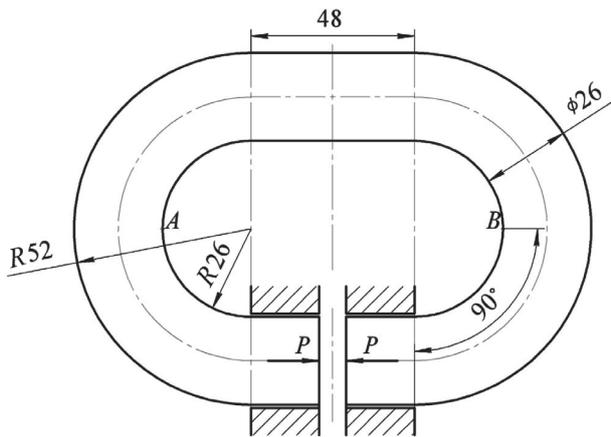


Рис. 1. Схема контактно-стыковой сварки звена якорной цепи калибра 26

действуют нормальные и касательные напряжения. Для возможности рассмотрения пластического изгиба на значительную кривизну под действием нормальных и касательных напряжений необходимо задаться эпюрой нормальных или касательных напряжений, но для этого не имеется обоснованных критериев [9]. Поэтому касательными напряжениями  $\tau_{\rho\theta}$  придется пренебречь и рассматривать данный случай как чистый изгиб моментом, который непрерывно изменяется по пролету изгибаемого прутка.

Распределение напряжений по высоте заготовки в месте приложения силы можно найти из совместного решения дифференциального уравнения равновесия и условия пластичности. Для анализа поля напряжений используем полярную систему координат с полюсом в центре кривизны заготовки.

Уравнение равновесия (рис. 3) имеет вид

$$\frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}}{\rho} = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\rho}$ ,  $\sigma_{\theta}$  — радиальные и тангенциальные напряжения соответственно.

Воспользуемся условием пластичности Треска-Сен-Венана [4], которое с учетом упрочнения примет вид

$$\begin{cases} \sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} = \sigma_{\tau 0} + E_T \ln \frac{\rho}{\rho_H}, & \sigma_{\rho} \sigma_{\theta} < 0; \\ |\sigma_{\theta}| > |\sigma_{\rho}| & \sigma_{\theta} = -\sigma_{\tau 0} + E_T \ln \frac{\rho}{\rho_H}, & \sigma_{\rho} \sigma_{\theta} > 0; \end{cases} \quad (2a)$$

$$\begin{cases} \sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} = \sigma_{\tau 0} + E_T \ln \frac{\rho}{\rho_H}, & \sigma_{\rho} \sigma_{\theta} < 0; \\ |\sigma_{\theta}| > |\sigma_{\rho}| & \sigma_{\theta} = -\sigma_{\tau 0} + E_T \ln \frac{\rho}{\rho_H}, & \sigma_{\rho} \sigma_{\theta} > 0; \end{cases} \quad (2b)$$

где  $\sigma_{\tau 0}$  — экстраполированный предел текучести;  $E_T$  — модуль упрочнения;  $\rho_H$  — радиус нейтрального слоя напряжений.

Из рис. 3 следует, что формула (2a) соответствует области тангенциального растяжения  $\rho_H < \rho < R$ , а вторая — области тангенциального сжатия  $r < \rho < \rho_H$ .

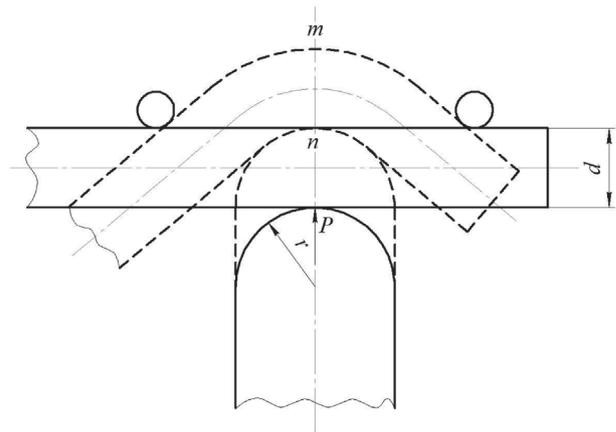


Рис. 2. Схема нагружения при изгибе прутка

Формула для определения радиуса нейтральной поверхности применительно к случаю изгиба без упрочнения, полученная авторами статьи, имеет вид

$$\rho_H = \frac{1}{4} (\sqrt{R} + \sqrt{r})^2. \quad (3)$$

В работе [8] было установлено, что упрочнение не влияет на положение нейтральной поверхности напряжений, поэтому при изгибе с упрочнением формула (3) также имеет место.

Интегрируя совместно уравнение равновесия (1) с формулой (2a) при граничных условиях на наружной поверхности  $\sigma_{\rho}(\rho = R) = 0$ , получим выражения для напряжений в зоне тангенциального растяжения:

$$\begin{cases} \sigma_{\rho} = -\left( \sigma_{\tau 0} + \frac{E_T}{2} \ln \frac{\rho R}{\rho_H^2} \right) \ln \frac{R}{\rho}; \\ \sigma_{\theta} = \sigma_{\tau 0} \left( 1 - \ln \frac{R}{\rho} \right) + \frac{E_T}{2} \left( 2 \ln \frac{\rho}{\rho_H} - \ln \frac{\rho R}{\rho_H^2} \ln \frac{R}{\rho} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Для зоны тангенциального сжатия проинтегрируем совместно (1) с условием пластичности формулы (2b) при граничных условиях на внутренней поверхности  $\sigma_{\rho}(\rho = r) = 0$ , а следовательно, получим выражения для напряжений в зоне тангенциального сжатия:

$$\begin{cases} \sigma_{\rho} = -\left( \sigma_{\tau 0} + \frac{E_T}{2} \ln \frac{\rho R}{\rho_H^2} \right) \ln \frac{R}{\rho}; \\ \sigma_{\theta} = \sigma_{\tau 0} \left( 1 - \ln \frac{R}{\rho} \right) + \frac{E_T}{2} \left( 2 \ln \frac{\rho}{\rho_H} - \ln \frac{\rho R}{\rho_H^2} \ln \frac{R}{\rho} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Зная распределение напряжений по толщине прутка из формул (4) и (5), можно определить изгибающий момент, необходимый для пластического изгиба. В общем случае момент может быть найден

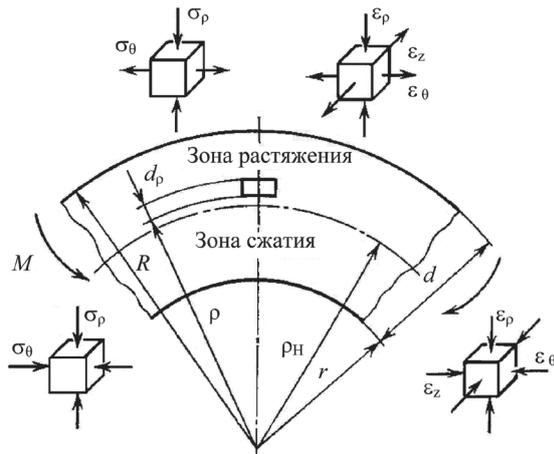


Рис. 3. Схема напряженного и деформированного состояния при изгибе узких полос

как сумма моментов, создаваемых напряжениями  $\sigma_\theta$  в зоне растяжения и зоне сжатия, которые определяются суммой интегралов:

$$M = \int_{\rho_H}^R \sigma_\theta^+ \cdot b(\rho) \cdot \rho d\rho + \int_r^{\rho_H} \sigma_\theta^- \cdot b(\rho) \cdot \rho d\rho, \quad (6)$$

где  $b(\rho)$  — толщина сечения, которая, очевидно, для круглого сечения является переменной и определяется по формуле

$$b(\rho) = 2\sqrt{\frac{d^2}{4} - \left(\rho - \frac{R+r}{2}\right)^2}.$$

Интеграл (6) берется при помощи приближенных методов или с использованием пакета MathCAD.

Аналитически величины остаточных напряжений можно установить на основании теоремы о разгрузке [2]. Согласно этой теореме связь между напряжениями и деформациями подчиняется закону Гука. Если тело при нагружении испытывало неоднородную деформацию, то при разгрузке в нем возникнут остаточные

напряжения. Их величина определяется как разность между напряжениями, действующими в нагруженном теле, и фиктивными напряжениями, которые возникли бы в теле при том же внешнем силовом воздействии, но при условии только упругого деформирования.

Из условия равенства момента пластического изгиба, определяемого формулой (6), и фиктивного момента упругих деформаций изгиба можно найти величину напряжения, возникающего в прутке вследствие действия фиктивного упругого момента,

$$\sigma^{\text{разг}} = \frac{M}{I} \left( \rho - \frac{R+r}{2} \right), \quad (7)$$

где  $I$  — момент инерции сечения относительно оси, перпендикулярной направлению действия силы  $P$ , который для круглого сечения определяется как [7]

$$I = \frac{\pi d^4}{64}.$$

На основании упомянутой выше теоремы о разгрузке остаточные напряжения могут быть определены по формуле

$$\sigma^{\text{ост}} = \begin{cases} \sigma_\theta^+ - \sigma^{\text{разг}}, & \rho_H < \rho < R; \\ \sigma_\theta^- - \sigma^{\text{разг}}, & r < \rho < \rho_H, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\sigma_\theta^+$  определяется выражением (4),  $\sigma_\theta^-$  — (5), а  $\sigma^{\text{разг}}$  — (7).

Итак, определим величину остаточных напряжений в сечении прутка. Механические характеристики материала сталь 25 при  $T = 400^\circ\text{C}$ :  $\sigma_b = 465$  МПа,  $\sigma_T = 165$  МПа,  $\delta_{10} = 25\%$  [3]. Характеристики материала, входящие в формулы (4) и (5), определяются согласно примеру, приведенному в [1]:  $\sigma_{T0} = 445$  МПа,  $E_T = 675$  МПа.

На основании формулы (8) эпюра остаточных напряжений, вызванных гибкой при температуре  $T = 400^\circ\text{C}$  в поперечном сечении прутка из стали 25, представлена на рис. 4.

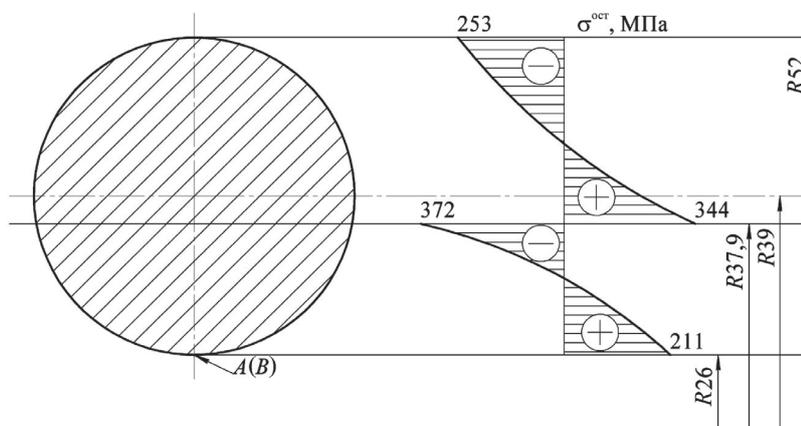


Рис. 4. Остаточные напряжения в сечении  $m-n$  прутка из стали 25 (см. рис. 2) после гибки при температуре  $T = 400^\circ\text{C}$

При прохождении тока шунтирования его плотность на внутреннем контуре звена выше, чем во внешних слоях, таким образом, близкие к внутреннему контуру слои нагреваются больше чем внешние. При достижении температуры  $T = 560$  °С предел прочности волокон, находящихся на внутренней поверхности, падает до  $\sigma_v \approx 200$  МПа. Остаточные напряжения растяжения в этой области превосходят величину предела прочности (см. рис. 4), вследствие чего происходит разрушение или зарождается трещина, которая прекращает свой рост в области достаточно больших остаточных напряжений сжатия (вблизи нейтральной поверхности).

## ВЫВОДЫ

1. Теоретически обоснован и подтвержден на примере механизм образования трещины на внутренней поверхности звеньев якорных цепей. Установлено, что причиной образования трещины является совместное действие неравномерного нагрева места изгиба звена током шунтирования и высоких остаточных напряжений растяжения, возникающих на внутренней поверхности звена в процессе изгиба.

2. Для звена, выполненного из материала сталь 25, рассчитаны остаточные напряжения в месте приложения нагрузки по сечению прутка, возникающие в процессе изгиба при температуре  $T = 400$  °С.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Зубцов, М. Е.** Листовая штамповка [Текст] : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и обработка металлов давлением» / М. Е. Зубцов. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. — 432 с.
- [2] **Ильюшин, А. А.** Пластичность. Ч. 1 Упруго-пластические деформации [Текст] / А. А. Ильюшин. — М. : ОГИЗ, 1948. — 376 с.
- [3] Марочник сталей и сплавов [Текст] / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.] ; под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М. : Машиностроение, 1989. — 640 с.
- [4] **Можаровський, М. С.** Теорія пружності, пластичності і повзучості [Текст] : підручник / М. С. Можаровський. — К. : Вища школа, 2002. — 308 с.
- [5] **Мошнин, Е. Н.** Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование [Текст] / Е. Н. Мошнин. — 2-е изд. перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1967. — 272 с.
- [6] **Надаи, А.** Пластичность и разрушение твердых тел [Текст] : [пер. с англ.] / А. Надаи ; под ред. Г. С. Шапиро. — М. : Изд-во иностр. лит., 1954. — 647 с.
- [7] **Писаренко, Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. — К. : Наукова думка, 1975. — 704 с.
- [8] **Ренне, И. П.** Пластический изгиб листовой заготовки [Текст] / И. П. Ренне // Труды Тульск. мех. ин-та. — М., 1950. — Вып. 4. — С. 146–162.
- [9] **Ржаницын, А. Р.** Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов [Текст] / А. Р. Ржаницын. — 2-е изд., перераб. — М. : ГЛСА, 1954. — 288 с.
- [10] **Сторожев, М. В.** Теория обработки металлов давлением [Текст] / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. — М. : Высшая школа, 1963. — 388 с.

© А. В. Молтасов, С. М. Самотрясов, П. М. Чвертко

Надійшла до редколегії 21.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *В. В. Квасницький*

Статтю розміщено у Віснику НУК №5, 2012