

УДК 539.3

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ

*Докт. физ.-мат. наук, проф. ВАСИЛЕВИЧ Ю. В.,  
канд. техн. наук, доц. РЕУТ Л. Е., асп. ЯЗНЕВИЧ А. М.*

*Белорусский национальный технический университет*

Основным требованием к строительным, в том числе и арматурным, сталям является наличие высокой конструктивно-технологической прочности, под которой понимают сопротивление стали при ее работе в элементах конструкций нагрузкам, имеющим место при эксплуатации сооружений.

Современное производство арматурного проката характеризуется устойчивой тенденцией к снижению расхода дорогостоящих легирующих элементов при одновременном повышении прочностных параметров арматурных сталей за счет ее термического упрочнения. Таким образом, из углеродистых сталей (в основном Ст3) получают арматуру более высокого класса. Обеспечение высоких прочностных свойств достигается быстрым охлаждением арматуры в потоке сортовых станов 250 на специальной установке термического упрочнения [1]. Установлено, что в результате термического упрочнения по режиму прерывистой закалки арматуры в сечении стержней формируется структура в виде соосно расположенных структурных слоев. Получаемая при таком технологическом воздействии арматура относится к классу функционально-градиентных (слоистых) материалов, характерной особенностью которой является явно выраженное плавное изменение механических свойств, химического состава и других характеристик по поперечному сечению стержня. В результате обработки прокат получает новые механические, технологические и другие свойства, влияние которых на изменение конструктивно-технологической прочности в значительной мере не исследовано. Установ-

лено, что слоистое строение таких арматурных стержней зависит от диаметра стержня. С его увеличением от 12 до 22 мм повышается и толщина упрочненных поверхностных слоев при сохранении структурных составов [2].

Наличие в поперечном сечении арматурных стержней диаметром 16; 20; 22 мм (материал арматуры – Ст3пс) и 40 мм (сталь 18Г2С) структурной неоднородности подтверждают и исследования диаметрального распределения микротвердости. При этом максимальную твердость имеет приповерхностная часть арматурного стержня, а минимальную – центральный участок [3].

Конструктивно-технологическая прочность обычной арматуры железобетонных конструкций экспериментально изучалась рядом авторов [4–6]. По данным указанных работ можно выделить факторы, определяющие конструктивно-технологическую прочность арматурного проката. Геометрия профиля существенно сказывается на пластичности и прочности арматурного стержня. Она предопределяет напряженно-деформированное состояние поверхностной зоны арматуры. На работе продольного ребра арматурного стержня сказывается наличие на нем дефектов (надрезы, подрезы, вмятины и другие концентраторы напряжений). Насечки на продольных ребрах приводят к хрупкому разрушению. Надрез продольного ребра стержня из стали 35ГС вызвал уменьшение в 6–7 раз относительного сужения образца при разрыве сравнительно с теми же характеристиками неповрежденного стержня [5]. Местное воздействие сварки приводит к

изменению структуры материала, вызывает снижение конструктивно-технологической прочности, снижает сопротивляемость хрупким разрушениям, переменным нагрузкам и воздействиям коррозионной среды. Сварные соединения, выполненные контактной сваркой, показали высокую прочность соединений и стабильность результатов испытаний. Разрушение происходит рядом со стыком, в местах подплавлений, надрезов и т. п. Подплавление продольного ребра при контактно-стыковой сварке также приводит к хрупкому разрушению стержня.

Проведенные опыты позволили классифицировать участки арматурного стержня по опасности конструктивно-технологических воздействий (рис. 1).

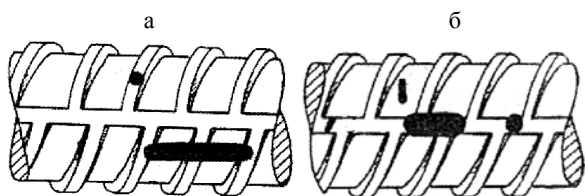


Рис. 1. Участки арматурного стержня по опасности конструктивно-технологических воздействий: а – места неопасных воздействий; б – места, в которых конструктивно-технологические воздействия недопустимы [5, 6]

Поставляемая металлургами арматура в процессе изготовления и эксплуатации подвергается ряду технологических воздействий (резка, правка, сварка и т. д.), и это может существенно повлиять на прочность арматуры как отдельного элемента, так и в составе конструкций.

Чтобы определить влияние конструктивных дефектов на прочность арматурных стержней, рассмотрим цилиндрический стержень с центрально приложенной растягивающей силой. Примем в расчет конструктивно-технологический дефект в виде среза разной глубины (рис. 2). Наличие такого дефекта принципиально изменяет вид нагружения, так как в этом случае центр тяжести смещается, а сила  $F$ , приложенная по оси стержня, создает внецентренное растяжение.

Максимальные напряжения в сечении при таком виде деформирования могут значительно превышать напряжения, возникающие при центральном растяжении стержня с цельным круг-

лым сечением. Для определения этих напряжений и оценки прочности арматурного стержня при наличии указанного дефекта рассмотрим влияние глубины среза на геометрические характеристики сечения (рис. 3).

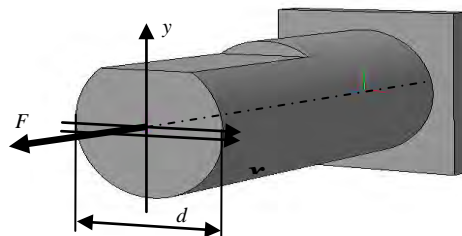


Рис. 2. Цилиндрический стержень с конструктивно-технологическим дефектом

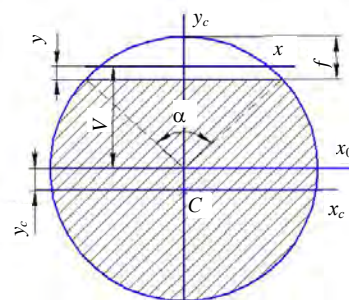


Рис. 3. Поперечное сечение стержня с вырезом

Глубина среза  $f$  (высота срезанного сегмента) определяется следующим образом:

$$f = d \sin^2 \frac{\alpha}{4} \quad (1)$$

и является функцией центрального угла  $\alpha$ , поэтому остальные геометрические параметры сечения будут рассмотрены как функции этого угла, косвенно зависящие от глубины среза  $f$ :

- расстояние от центра круга до центра тяжести срезанного сегмента

$$V = \frac{d}{2} \frac{4 \sin^3 \frac{\alpha}{2}}{3 \left( \frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right)}; \quad (2)$$

- положение центра тяжести сегмента

$$y = \frac{d}{2} \left[ \frac{4 \sin^3 \frac{\alpha}{2}}{3 \left( \frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right)} - \cos \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (3)$$

Момент инерции сегмента относительно собственной оси  $x$ , который согласно правилу определения моментов инерции при переходе к параллельным осям равен

$$I_x = I_{x_0} - A_{\text{сегм}} V^2 = \frac{d^4}{128} \left[ \frac{\pi \alpha}{180} - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right] - A_{\text{сегм}} V^2; \quad (4)$$

полная площадь сечения при наличии среза

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{кр}} - A_{\text{сегм}} = \frac{d^2}{8} \left[ 2\pi - \frac{\pi \alpha}{180} + \sin \alpha \right]; \quad (5)$$

положение центра тяжести сечения с учетом дефекта

$$y_c = -\frac{2}{3} d \left[ \frac{\sin^3 \frac{\alpha}{2}}{2\pi - \frac{\pi \alpha}{180} + \sin \alpha} \right]; \quad (6)$$

суммарный момент инерции и радиус инерции срезанного сечения

$$\begin{aligned} J_{x_c} &= J_{x_{\text{кр}}} - J_{x_{\text{сегм}}} = \\ &= \frac{d^4}{128} \left\{ 2\pi \left[ 1 + \left( 4 \frac{y_c}{d} \right)^2 \right] - \frac{\pi \alpha}{180} + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right\} + \\ &+ A_{\text{сегм}} y_c (2V + y_c); \end{aligned} \quad (7)$$

$$i_{x_c}^2 = \frac{J_{x_c}}{A_{\text{полн}}}. \quad (8)$$

Расчет геометрических характеристик сечения, представленный в (1)–(8), удобнее производить численными методами и представлять их значения в зависимости от угла  $\alpha$  в виде графиков или таблиц. Данный расчет был произведен для значений угла  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , т. е. для величины среза от нуля (цельное сечение) до  $0,5d$  (сечение – полукруг).

Максимальные напряжения в таком сечении в результате внецентренного растяжения возникают в точках, наиболее удаленных от

нейтральной оси, положение которой определяется по отрезку

$$y_n = -\frac{i_{x_c}^2}{y_F} \quad (9)$$

и также зависит от глубины срезанной части сечения. Таким образом, нейтральная ось в зависимости от положения центра тяжести сечения передвигается параллельно центральной оси  $x_c$ , пересекая его и создавая в нем напряжения двух знаков, и при каких-то значениях угла  $\alpha$ , т. е. глубины среза, может выйти за пределы сечения.

Однако при любом положении нейтральной оси максимальные напряжения возникают в точках контура на срезе сечения как наиболее удаленных от этой оси и определяются по формуле

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{F}{A_{\text{полн}}} \left( 1 + \frac{y_F y_{\text{max}}}{i_{x_c}^2} \right). \quad (10)$$

Обозначив в формуле (10)

$$k = \frac{1}{A_{\text{полн}}} \left( 1 + \frac{y_F y_{\text{max}}}{i_{x_c}^2} \right), \quad (11)$$

получаем зависимость

$$\sigma_{\text{max}} = kF, \quad (12)$$

где  $k$  – коэффициент, косвенно зависящий от глубины среза, т. е. через геометрические параметры сечения.

В данной работе расчет произведен для стержней  $d = 12$  и  $25$  мм. В результате численного решения задачи на основании формул (1)–(12) была получена зависимость максимальных напряжений от глубины среза, представленная на рис. 4.

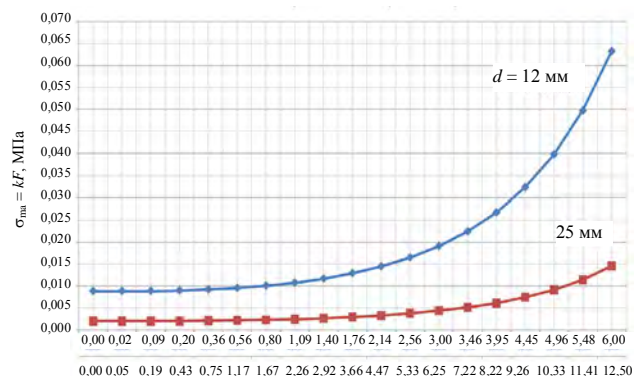


Рис. 4. График зависимости напряжения в опасном сечении стержня от глубины дефекта: верхняя шкала глубины для арматуры  $d = 12$  мм, нижняя – для  $d = 25$  мм

Как видно на рис. 4, при незначительном срезе сечения до величины порядка  $f = (0,12-0,15)d$  напряжения малочувствительны к наличию дефекта и их значение соответствует напряжениям, которые возникали бы в неповрежденном круглом сечении при растяжении. Однако с увеличением среза напряжения заметно возрастают и уже при глубине дефекта  $f = 0,25d$  увеличиваются в два раза и далее растут почти скачкообразно.

Чтобы обеспечить прочность такого арматурного стержня, необходимо установить для него максимально допустимую нагрузку в зависимости от степени его повреждения. Для этого максимальные напряжения из графика (рис. 4), возникающие при данной глубине среза, следует ограничить допустимым значением, безопасным для данного материала:

$$\sigma_{\max} = kF \leq [\sigma]. \quad (13)$$

Откуда

$$[F] \leq \frac{[\sigma]}{k} = \frac{\sigma_{\text{опас}}}{nk}, \quad (14)$$

где  $n$  – коэффициент запаса прочности;  $\sigma_{\text{опас}}$  – опасное напряжение, соответствующее предельному состоянию материала – текучести или хрупкому разрушению, которое для данного материала может быть определено опытным путем.

По результатам исследований арматурного проката (табл. 1) по ТУ РБ 04778771.001–97 производства РУП «БМЗ» принимаем механические характеристики прочности [3].

Таблица 1

**Характеристики арматурных стержней**

№ п/п	Класс арматуры, марка стали	Ø, мм	Механические свойства	
			$\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>
1	Ат500С	12	585,0	675,0
2	Ат500С	25	550,0	660,0

Кроме величины максимальных напряжений, определяющих прочность арматурного стержня, важным является также характер их распределения по сечению. И здесь определяющую роль играет положение нейтральной оси в сечении. С увеличением среза возникает ситуация (при

$f > 0,264d$ ), когда нейтральная ось начинает пересекать сечение и приближаться к центру сечения, создавая в нем напряжения двух знаков (рис. 5). Это негативно отражается на любых материалах, и особенно хрупких.

В данном расчете в качестве модели была принята однородная изотропная структура. На изменении конструктивно-технологической прочности рассмотренных арматурных стержней существенно сказывается их начальная слоистость. Исследования и расчеты на прочность с учетом неоднородной структуры, а также влияние на прочность наличия в сечении напряжений двух знаков будут рассмотрены в дальнейшем.

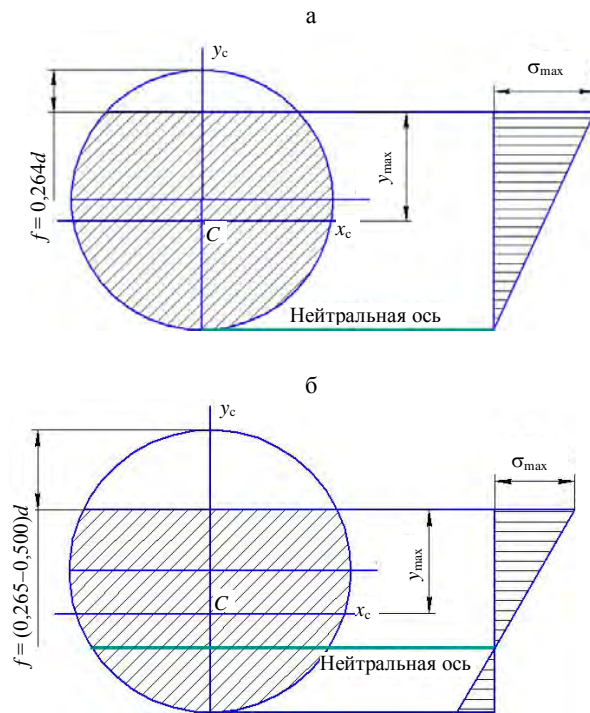


Рис. 5. Характер распределения напряжений по сечению стержня: а –  $f = 0,264d$ ; б –  $(0,265-0,500)d$

**ВЫВОДЫ**

1. Данные экспериментов позволяют выделить на поверхности арматурного горячекатаного стержня участки по опасности конструктивно-технологических воздействий: а – места неопасных воздействий; б – места, в которых конструктивно-технологические воздействия недопустимы (рис. 1). Исследование конструктивной прочности арматурных изделий и их предельных состояний необходимо проводить

с учетом указанных участков.

2. При проектировании изделий из исследованных арматурных стержней, у которых более прочные слои располагаются в приповерхностной зоне, необходимо учитывать влияние наличия и величины дефектов на прочность арматуры, а также чувствительность к изменениям механических характеристик слоев при технологических, эксплуатационных, температурных, коррозионных воздействиях.

3. При увеличении глубины дефекта от  $(0,265-0,500)d$  диаметра стержня нейтральная ось сечения смещается к центру тяжести и в поперечном сечении арматуры имеют место напряжения разных знаков.

арматуры / А. Б. Юрьев [и др.] // Технология металлов. – 2005. – № 9. – С. 5–7.

2. Прочность структурных слоев в сечении термически упрочненной арматуры / В. Я. Чинокалов [и др.] // Технология металлов. – 2005. – № 10. – С. 15–18.

3. Мойсейчик, Е. А. Макроструктура арматурных стержней / Е. А. Мойсейчик // Машиностроение. – 2007. – Вып. 23. – С. 353–358.

4. Мадатян, С. А. Арматура железобетонных конструкций / С. А. Мадатян. – М., 2000. – 256 с.

5. Соколовский, П. И. Арматурные стали / П. И. Соколовский. – М.: Metallurgy, 1964. – 207 с.

6. Дулькин, В. Я. Конструктивная прочность стержневой арматуры железобетона / В. Я. Дулькин. – Петрозаводск: Карельское кн. изд-во, 1967. – 63 с.

#### ЛИТЕРАТУРА

Поступила 23.12.2010

1. Структура термически упрочненной стержневой

УДК 621.923.7

## ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНО ПОЛИРОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ

*Канд. техн. наук, доц. СИНЬКЕВИЧ Ю. В., инж. ГРИНЕВИЧ А. А.,  
канд. техн. наук ЯНКОВСКИЙ И. Н.*

*Белорусский национальный технический университет*

Шероховатость поверхности, являющаяся одной из основных геометрических характеристик качества поверхности, оказывает значительное влияние на эксплуатационные показатели детали [1]. Механизм формирования топографии поверхности при электроимпульсном полировании (ЭИП) достаточно сложен, включает в себя физические, химические, геометрические и технологические аспекты, которые взаимосвязаны и на сегодняшний день мало изучены.

В настоящее время существует несколько гипотез о механизме сглаживания микронеровностей поверхности в процессе ЭИП [2–8]. Они основываются на опыте электроэрозионной обработки и электрохимического полирования и сводятся к тому, что напряженность электриче-

ского поля на вершинах микровыступов обрабатываемой поверхности должна быть значительно выше по сравнению с микровпадинами. Поэтому, по мнению авторов, возникновение электрических разрядов происходит преимущественно на вершинах микровыступов. Формирование топографии поверхности в процессе полирования обеспечивается за счет избирательного электроэрозионного и электрохимического сглаживания микровыступов поверхности. Однако предложенные гипотезы, в том числе в части типов и механизмов электрических разрядов в парогазовой оболочке (ПГО) и ионного распыления оксидных слоев, не имеют ни экспериментального, ни теоретического обоснования. Эти гипотезы ошибочно базиру-