

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА ИЗ СЛОЯ В СЛОЙ ПРИ ИЗГИБЕ СТЕРЖНЯ С РАЗНЫМИ ФОРМАМИ СЕЧЕНИЙ

Муравьёв Ю.В.

Индивидуальный предприниматель, Саратов

Ключевые слова: изгиб, гипотеза о ненадавливании слоёв, экспериментальная проверка, визуализация деформаций, пластические деформации, сталь, силиконовая резина.

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования перераспределения материала при изгибе и их сравнение с теорией. Наглядно показана недооценка этого фактора в теории изгиба. Предложен способ моделирования, учитывающий этот фактор. Предложена методика визуализации интенсивности пластических деформаций на шлифованном срезе стальных образцов.

REDISTRIBUTION OF MATERIAL FROM LAYER TO LAYER DURING BENDING OF A ROD WITH DIFFERENT CROSS-SECTIONAL SHAPES

Muravyov Yu.V.

Individual entrepreneur, Saratov

Keywords: bending, non-pressure ply hypothesis, experimental verification, strain visualization, plastic deformations, steel, silicone rubber.

Abstract. The paper presents the results of experimental study of material redistribution in bending and their comparison with the theory. The underestimation of this factor in the bending theory is clearly shown. A modeling method that takes this factor into account is proposed. The method of visualization of plastic deformation intensity on the ground shear of steel specimens is proposed.

В теориях изгиба часто используется гипотеза о ненадавливании слоёв. В некоторых случаях (поперечный изгиб распределённой нагрузкой, изгиб стержня с начальной кривизной) приводятся формулы для расчёта надавливания слоёв, но каждый раз уточняется, что эти напряжения малы и их можно не принимать в расчёт. Я не встречал публикаций, в которых бы упоминалось и учитывалось ярко выраженное перераспределение материала из слоя в слой при изгибе.

Давно известно, что распределение нормальных напряжений при изгибе стержня, имеющего начальную кривизну (рис. 1, б), формула (2) ([1] стр. 171), существенно отличается от их распределения для изначально прямого стержня (рис. 1, а), формула (1) ([1] стр. 48):

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{J}, \quad (1)$$

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{A \cdot e \cdot (r - y)}, \quad (2)$$

где σ_x – нормальные напряжения, M – изгибающий момент в сечении, J – момент инерции сечения, A – площадь сечения, e – расстояние от нейтральной оси до центра тяжести сечения, r – радиус кривизны.

Формула (2) упрощённая, полный вариант [1] стр. 171 более сложен и дополнительно содержит формулу надавливания слоёв, но там же утверждается что формула (2) достаточна для практического применения.

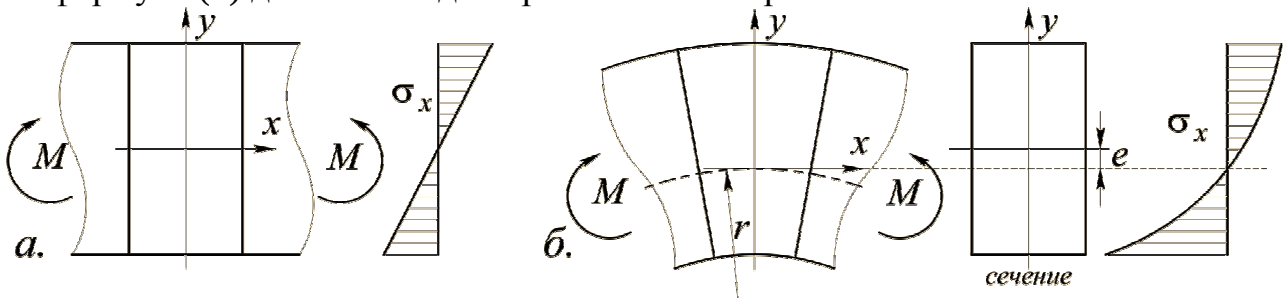


Рис. 1. Схема изгиба и эпюра σ_x для изначально прямого стержня (а) и стержня, уже имеющего изгиб (б) ([1] стр. 169)

Физическая причина этой ярко выраженной асимметрии напряжений проста и очевидна – в вырезаемом двумя соседними сечениями участке у изначально прямого стержня сверху и снизу от нейтральной линии находится и воспринимает нагрузку одинаковое количество материала (рис. 1, а), а у криволинейного – разное (рис. 1, б). Разумеется, в случае пластических деформаций эпюра σ_x будет другой, но сам принцип концентрации напряжений на внутренней поверхности крюка будет соблюдаться и в этом случае.

И тут возникает коварный вопрос – как быть, если криволинейный стержень изначально получен из прямого, путём его пластического деформирования? По какой схеме его рассматривать под рабочей нагрузкой – по схеме изначально прямого (каковым он был до придания формы путём изгиба) или по схеме с начальной кривизной?

Согласно гипотезе об отсутствии перераспределения, материал не должен перемещаться из слоя в слой, соответственно при формообразующем изгибе сечение приобретёт "грушевидную" форму, которая и скомпенсирует это разное количество материала в слоях сечения. Тут сразу же вспоминается хорошо известное искажение формы прямоугольного сечения (рис. 2, а). И тогда правильный ответ – нужно рассматривать стержень с учётом такой формы поперечного сечения, т.е. по схеме изначально прямого стержня в условиях больших деформаций и с учётом искажения формы сечения.

А теперь обратимся к стержню круглого сечения. Согласно ГОСТ 30136-95, круглая стальная горячекатаная проволока (катанка) «должна выдерживать в холодном состоянии изгиб на 180° вокруг оправки диаметром, равным диаметру испытываемой катанки».

Легко посчитать, что относительные деформации растяжения-сжатия в крайних слоях в этом испытании составляют 50%, что значительно больше предельно достижимых 20-30% при одноосном растяжении низкоуглеродистых сталей. В [2] приводится обзор экспериментальных работ, зафиксировавших увеличение предельного растяжения материала при его испытаниях на изгиб. Авторы [2] объясняют это явление «стеснением деформаций», и связывают его с наличием градиента напряжений. Возможность перераспределения материала из слоя в слой в [2] не упоминается.

Одноосные испытания низкоуглеродистых сталей показывают, что их предельное удлинение составляет 20-30% (в зависимости от марки стали), а предельное сжатие не достижимо, поскольку образец можно расплющить в тонкий блин, но разрушения при этом не произойдёт. Исходя из этого и из модели распределения напряжений на рисунке 1, а, логично было бы предположить, что разрушение при изгибе должно начинаться с разрыва растянутых слоёв. Однако в моих экспериментах удавалось получить изгиб с деформациями крайних слоёв 100% (рис. 3, а) при этом в растянутых слоях не наблюдалось ни малейших признаков начала разрушения. А в сжатых слоях неизменно появлялась трещина (рис. 3, б). Такое поведение материала характерно как раз для варианта на рисунке 1, б, где напряжение в растянутых слоях заметно меньше, а в сжатых наблюдается концентрация напряжений. Образец на рисунке 3, а – катанка из стали 3 диаметром 6,5 мм. Полосы для визуализации сечений нанесены на прямой стержень маркером. Ширина полос и расстояние между ними 2 мм. Образец сначала изогнут по схеме из ГОСТ 30136-95, а затем дополнительно сжат тисками до состояния показанного на рисунке 3, а. Максимальная ширина полосы после изгиба составляет 4 мм, и соответствует двукратному (100%) растяжению внешнего слоя.

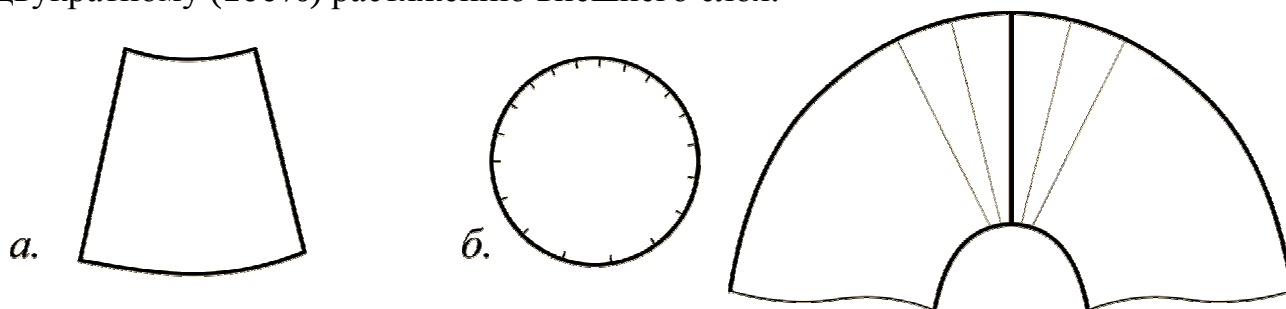


Рис. 2. Искажение формы сечения при изгибе: а – классическое из учебников, б – экспериментальный изгиб стального образца круглого сечения с сеткой

Разберёмся? что происходит с поперечным сечением круглого стержня при изгибе. На рисунке 2б показан шлиф поперечного сечения и форма изогнутого образца из стали 3 диаметром 9 мм. Исходная цилиндрическая форма образца получена на токарном станке. На образец резцом нанесена равномерная квадратная сетка с шагом 2 x 18,95°мм. Как видно на шлифе после распиливания образца по сечению:

- угловая сетка оказалась искажена – расширилась в сжатой области и сузилась в растянутой;
- сама форма сечения осталась круглой и не приобрела характерной грушевидности как на рисунке 2, а.

Некоторые стали обладают способностью «проявлять» поля пластических деформаций после травления их полированного шлифа в соляной кислоте (рис. 3, б). В частности, я обнаружил такой эффект на горячекатаной проволоке из стали 3. Механизм этого «проявления» в том, что в местах подвергшихся интенсивному деформированию повышается концентрация микродефектов. При травлении соляной кислотой в таких местах активнее выпадает осадок из углерода и за счёт этого на поверхности шлифа появляется визуализация

интенсивности деформаций (точнее сопровождающего их увеличения количества микродефектов) внутри образца.

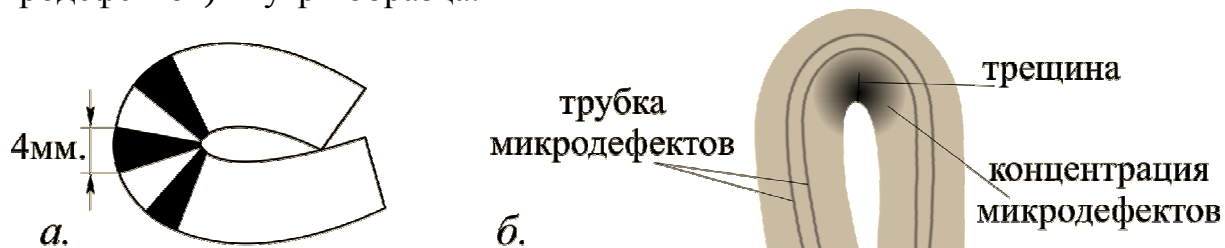


Рис. 3. Визуализация деформаций: а – демонстрация 100% удлинения, б – так выглядит шлиф после травления

Однако, далеко не все партии из стали 3 обладают этим свойством. Отсутствие способности к "проявлению" не зависит от содержания углерода (проверялось на образцах из стали 3 – стали 10). Т.е. это свойство зависит от каких то других особенностей стали (возможно, от её раскисления) и требует дополнительного исследования.

Технологическая операция горячего прокатывания круглой проволоки приводит к тому, что внутри проволоки образуется «трубка из микродефектов», которую можно визуализировать травлением шлифа (если сталь поддерживает такую визуализацию). «Трубка микродефектов» может иметь разный диаметр и не является идеально сцентрированной – в разных образцах её ось может быть по разному заметно смещена относительно оси проволоки. Из-за этого её визуализация не очень пригодна для точных количественных измерений внутреннего перераспределения материала. Однако на всех полученных мною образцах можно явно и очевидно отследить, как в области изгиба эта трубка смещается из сжатой области в растянутую (рис. 3, б). Т.е. это смещение является не случайным совпадением изначального смещения трубки с изгибом, а устойчиво повторяемым подтверждением соответствующего выдавливания материала.

Кроме смещения «трубки дефектов» травление визуализирует затемнение сжатой области вокруг трещины, что свидетельствует о том, что там во время изгиба происходила интенсивная пластическая деформация, соответствующая концентрации напряжений на рисунке 1, б.

После снятия нагрузки происходит небольшой упругий возврат формы стержня. При этом в области сжатия возникают растягивающие напряжения, а в области растяжения – сжимающие [3, стр. 50]. В насыщенной дефектами области сжатия этих напряжений оказывается достаточно чтобы раскрылась трещина, иногда достигающая середины сечения.

Для более детального исследования были изготовлены дополнительные образцы из силикона диаметром 32 мм и из стали диаметром 13,5 мм, деформации изгиба которых были исследованы с помощью высокоточного 3D-сканирования (рис. 4, 5). Пунктирный круг на рисунке 4 приведён для лучшей визуализации, а на рисунке 5 соответствует исходной форме сечения.

Как видно из рисунка 4 стальной образец повторил поведение образца на рисунке 2, б. Угловая сетка искажена, но форма сечения осталась круглой.

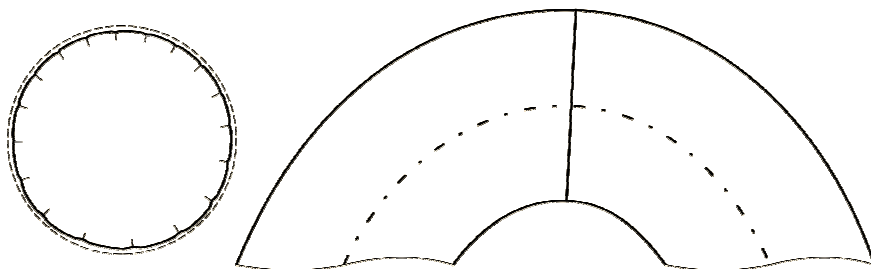


Рис. 4. Поперечный изгиб образца из Ст.3 диаметром 13,5 мм (3D сканер Solutionix Rexcan CS2+)

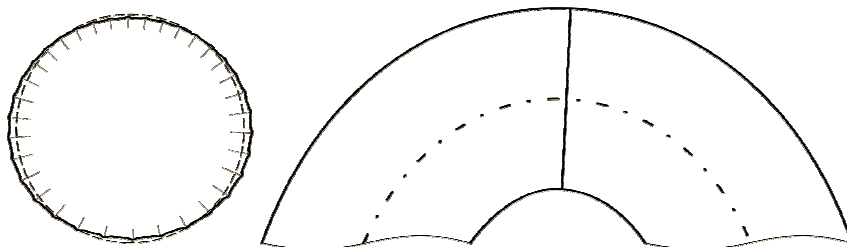


Рис. 5. Поперечный изгиб упругого образца из двухкомпонентного силикона диаметром 32 мм. (3D сканер Range Vision Pro (зона 2))

Исследование силиконового образца (рис. 5) проводилось с целью визуализации искажения сечения при упругих деформациях. В этом случае искажение угловой сетки носит похожий характер, но само сечение приобрело немного сплюснутую форму. Ассиметричного «грушевидного» искажения как на рисунке 2а здесь также не наблюдается.

Стержни прямоугольного сечения, в отличие от круглых, демонстрируют явное "грушевидное" искажение формы сечения. Однако в них тоже наблюдаются и аномально большие деформации растяжения, и трещины в области сжатия, и отклонение формы от показанной на рисунке 2, а, что свидетельствует о том, что там тоже имеет место перераспределение материала, хотя и иначе выраженное. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

Выводы

- При изгибе стержней круглого сечения происходит выдавливание материала из сжатого слоя в растянутый.
- Аномалии в поведении материала при изгибе следует объяснять не абстрактным "стеснением деформаций" [2], а вполне конкретным перераспределением материала.
- Перераспределение материала зависит от формы поперечного сечения и отличается в случае упругих и пластических деформаций.
- Современное 3D сканирование открывает принципиально новые возможности в исследовании деформаций и перемещений.
- В первом приближении пластический изгиб стержня круглого сечения можно смоделировать пошаговым применением формул (1) и (2). На первом шаге изначально прямой стержень приобретает кривизну. На последующих шагах в формулу (2) подставляется радиус кривизны из предыдущего шага. При достаточно мелких расчётных шагах получим близкую к реальности модель. Для полного моделирования требуется более детальное исследование механизма

перераспределения материала из слоя в слой и измерение его влияния на жёсткость стержня.

В настоящее время в материаловедении остро стоит проблема низкой доступности качественных и подробных экспериментальных данных, от классических до современных. Данная проблема поднята в [4]. Её решение значительно упростит обнаружение эффектов, подобных описанному в настоящей работе.

Список литературы

1. Тимошенко С.П., Лессельс Дж. Прикладная теория упругости. – Л.: ГТИ, 1931. – 392с.
2. Гениев Г.А., Калашников С.Ю. Инкрементальная теория нелинейного деформирования тел в условиях неоднородного напряжённого состояния. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2004. – 172 с.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
4. Муравьёв Ю.В. Обеспечить разработчиков теорий в естественных науках качественными и доступными экспериментальными данными. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://идея.росконгресс.рф/improject-145440/ideas/195981>.

Сведения об авторе:

Муравьёв Юрий Владимирович – индивидуальный предприниматель.