

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ДВОЙНОЙ ТОЛЩИНЫ ИЗ МАТЕРИАЛА С ПОКРЫТИЕМ

М.В. Илюшкин, к.т.н., В.И. Филимонов, д.т.н.

Гнутые профили находят широкое применение в различных областях промышленности и строительства. В последнее время все больше используются профили, изготовленных из материала с предварительно нанесенным полимерным и цинковым покрытием. В строительстве профили с покрытием можно разделить на декоративные и силовые. Декоративные профили, как правило, имеют небольшую толщину (не более 0,7-0,8 мм), но довольно сложное поперечное сечение. Довольно часто такие профили имеют элементы двойной толщины (ЭДТ) (рис. 1).

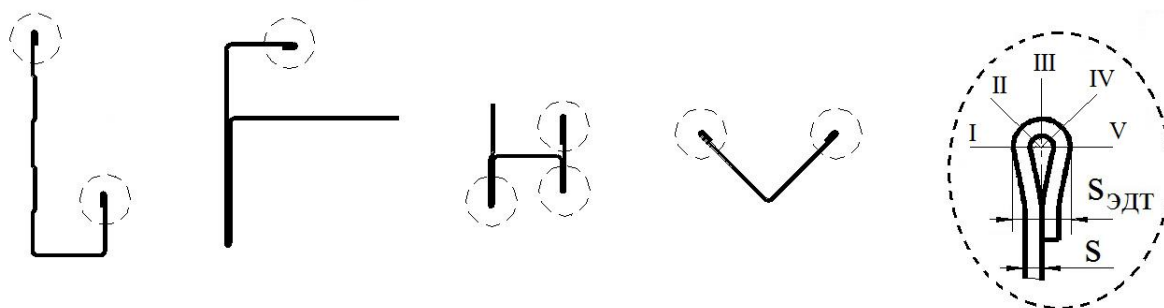


Рис. 1. Примеры гнутых профилей с элементами двойной толщины: I, II, III, IV, V – плоскости сечения ЭДТ, $S_{ЭДТ}$ – толщина ЭДТ

При формовке элемента двойной толщины возникают значительные деформации как по наружной, так и по внутренней зонам сгиба. Кроме того, сжатие такого элемента требует приложение значительных усилий, особенно если параметр $S_{ЭДТ}$ (см. рис. 1) приближается к величине $2S$, все это требует более детального исследования, особенно при использовании листового материала с покрытием.

Вначале рассмотрим существующие методы испытания для формования элемента двойной толщины.

1. Метод испытания прочности покрытия при изгибе “Т” [1].

Испытания проводят с помощью тисков. Образец изгибают на 180 град. на расстоянии 25 мм от его края (покрытием сверху) и затем сплющивают в тисках (рис. 2). Состояние покрытия на изгибе рассматривают с помощью лупы. Если на поверхности покрытия нет трещин, то прочность при первом изгибе соответствует 0Т. Если есть трещины, то образец продолжают изгибать указанным выше способом. При отсутствии трещин прочность покрытия при втором изгибе составляет 0,5Т. При наличии трещин образец изгибают третий раз. При отсутствии трещин прочность покрытия составит 1Т. При наличии на покрытии трещин изгибать продолжают до четырех, и более раз до исчезновения

трещин, при этом прочность покрытия составит $1,5T$, $2T$ и более. Минимальные радиусы гибов определяют по формуле:

$$R = \frac{S}{T},$$

где S – толщина материала, мм;

T – числовое значение прочности покрытия при изгибе “Т”.

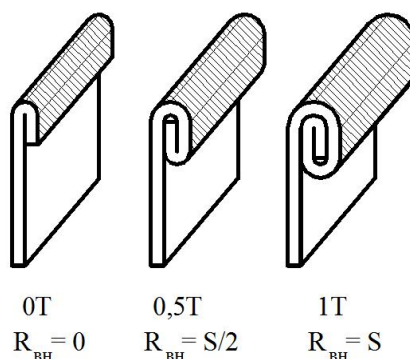


Рис. 2. Метод испытания прочности покрытия при изгибе “Т”

2. Метод испытания на изгиб [2]

При испытании на изгиб вначале образец устанавливают на опорах (рис. 3а) и изгибают посередине между опорами под действием непрерывно возрастающего усилия (рис. 3б). После этого образец подвергают дальнейшему изгибу между двумя параллельными плоскостями при постоянно возрастающем усилии (рис. 3в).

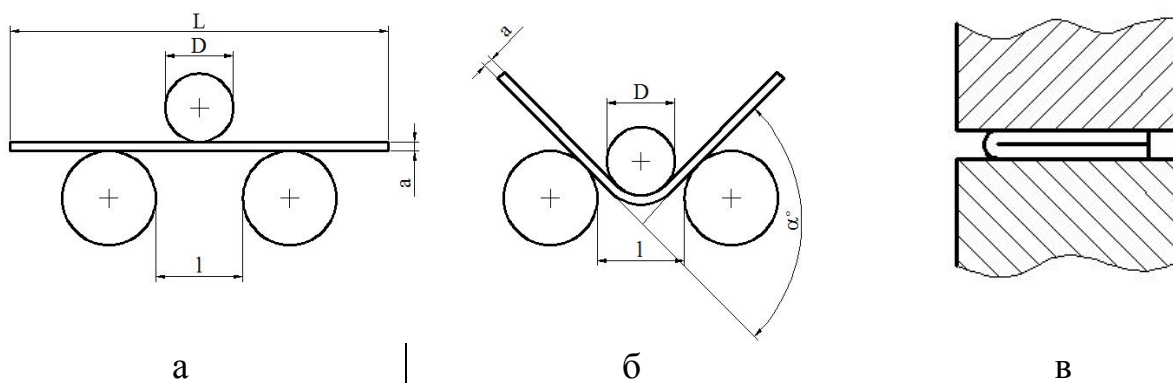


Рис. 3. Метод испытания на изгиб: а, б – изгиб до достижения заданного угла, в – изгиб до соприкосновения поверхности сторон

Хотя в этом методе не указывается непосредственное использование для испытания материала с покрытием, но его можно использовать для моделирования формирования элемента двойной толщины.

3. Испытание методом обкатки предварительно согнутой заготовки в цилиндрических роликах.

Этот метод был предложен нами ранее в работе [3] и заключается в обкатке предварительно согнутой заготовки между парами обкатных роликов с

постепенным их сведением от размера $(10-20)S$ до размера $2S$ с шагом сведения S (толщина заготовки) (рис. 4). При этом, на каждом проходе фиксируют состояние покрытия на наличие дефектов.

Преимущество данного метода испытания в том, что метод наиболее близкий к процессу деформирования листа при формообразовании гнутого профиля.

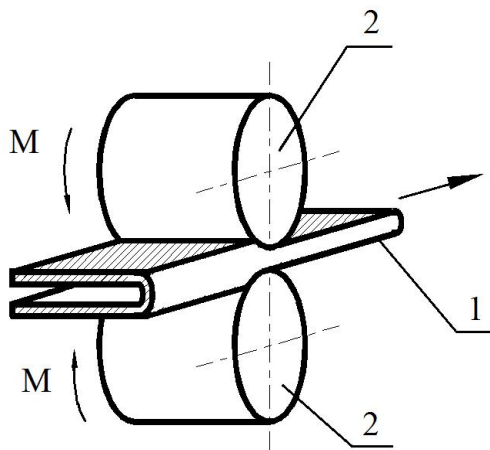


Рис. 4. Испытание методом обкатки предварительно согнутой заготовки в цилиндрических роликах: 1 – прокатываемая заготовка, 2 – цилиндрические валки

Для исследования процесса формообразования элемента двойной толщины было проведено моделирование по методу испытания на изгиб [2] (рис. 5).

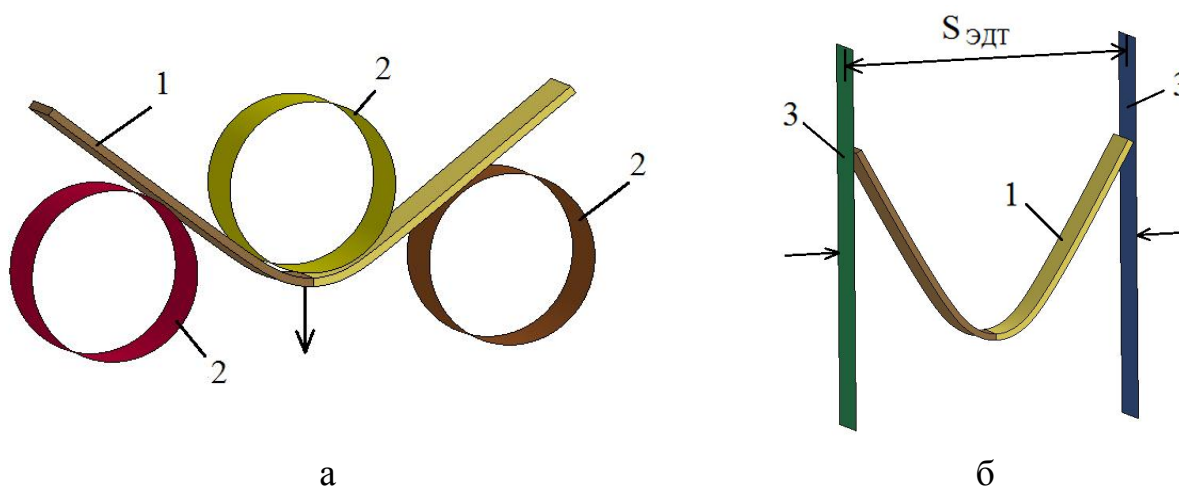


Рис. 5. Схема моделирования процесса изгиба на ЭДТ: а – 3-х точечный изгиб заготовки, б – изгиб до соприкосновения сторон, 1 – заготовка, 2 – ролики 3-х точечного изгиба, 3 – плоскости сжатия до образования ЭДТ

Процесс деформирования состоял из 2-х стадий: 3-х точечного изгиба (рис. 5а) и сжатия до элемента двойной толщины (рис. 5б). Расстояние между плоскостями в конце сжатия соответствовало толщине элемента двойной толщины $S_{ЭДТ}$.

Для исследования данного процесса использовалось математическое моделирование процесса с помощью программы динамического анализа LS-Dyna,

которая хорошо подходит для моделирования самых различных процессов ОМД [4]. Модель материала заготовки определялась картой *mat_plastic_kinematic. Характеристики материала заготовки приведены в табл. 1. Тип элемента заготовки определялся картой *section_solid (elform=1). Ролики 3-х точечного изгиба и плоскости сжатия определялись как твердые (rigid) тела. Контроль искажения задавался картой *hourglass (ihq=4, qm=0.05). Контакт определялся картой *contact_automatic_surface_to_surface (fs=0,01 fd=0,08). Для предотвращения самоконтакта определялся контакт между сегментами по внутренней поверхности ЭДТ. Ролики и плоскости сжатия перемещались со скоростью 1 м/сек. В качестве выходных параметров сохранялись этапы деформирования заготовки, а также параметры усилий (карта *database_rforc) и энергии (карта *database_matsum).

Размеры 3D модели были следующие (см. рис. 3): L=25 мм, D=10 мм, l=14 мм, a=0,5 мм. Ширина заготовки 4 мм.

Таблица 1

Характеристики материала заготовки

Плотность (ρ), т/м ³	7,85e-9
Модуль Юнга (E), МПа	2e5
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести (σ_T), МПа	250
Касательный модуль (E'), МПа	960
Параметр упрочнения (BETA)	1

На рис. 6 приведено сечение ЭДТ на заключительной стадии деформирования (расстояние между плоскостями сжатия $S_{ЭДТ}=2S$). На рисунке представлены, как пластические деформации по сечению ЭДТ (рис. 6а), так и сеточная модель в плоскодеформированном состоянии (рис. 6б), позволяющая визуально оценить деформирование слоев металла по сечению ЭДТ.

Как видно из рисунка, наибольшая величина пластической деформации достигается по внутренней зоне сгиба по плоскости I, V (см. рис. 1), где величина пластической деформации составляет 105%. Интересно, что на плоскости III внутренней зоны сгиба эта величина меньше и соответствует 83%. Что касается наружной зоны сгиба то здесь наибольшая пластическая деформации проявляется по плоскостям II и IV и составляет 61%, а по плоскости III – 50%. Интересно, что параллельные риски, расположенные на торце заготовки и после изгиба принимающие веерообразное положение имеют заметное искривление, что связано с воздействием значительных сжимающих сил с внешних сторон на заготовку.

Таким образом, ранее выдвинутые предположения, что наибольшие пластические деформации на ЭДТ находятся по биссектрисе угла зоны сгиба (плоскость III) для окончательных стадий формования ЭДТ являются неверными.

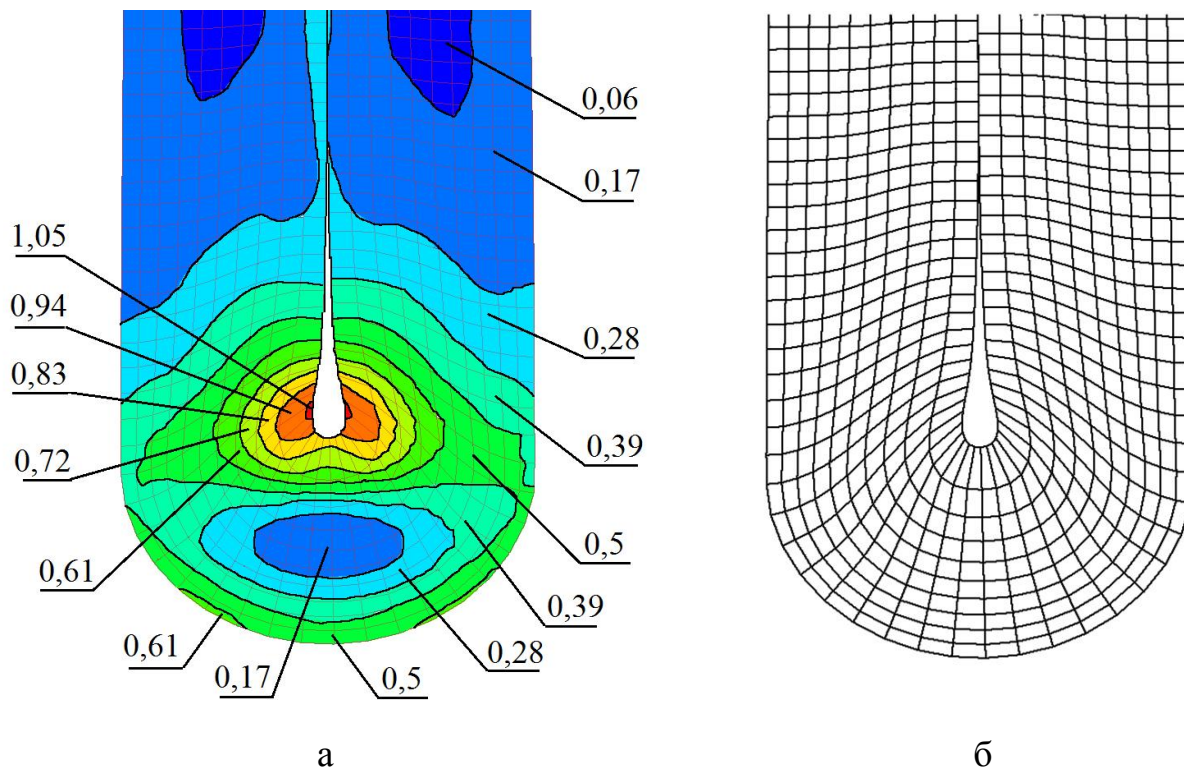


Рис. 6. Элемент двойной толщины на окончательной стадии формообразования при расстоянии между сжимными плоскостями 1 мм (2S): а – контуры и значения эффективных пластических деформаций по сечению ЭДТ, б – форма элементов конечно-элементной сетки по сечению ЭДТ

Для исследования зон максимальных деформаций по ЭДТ, в зависимости от величины сжатия (или толщины ЭДТ), был построен график зависимости эффективных пластических деформаций от расстояния между плоскостями сжатия для нескольких внутренних и внешних элементов по сечению ЭДТ (рис. 7).

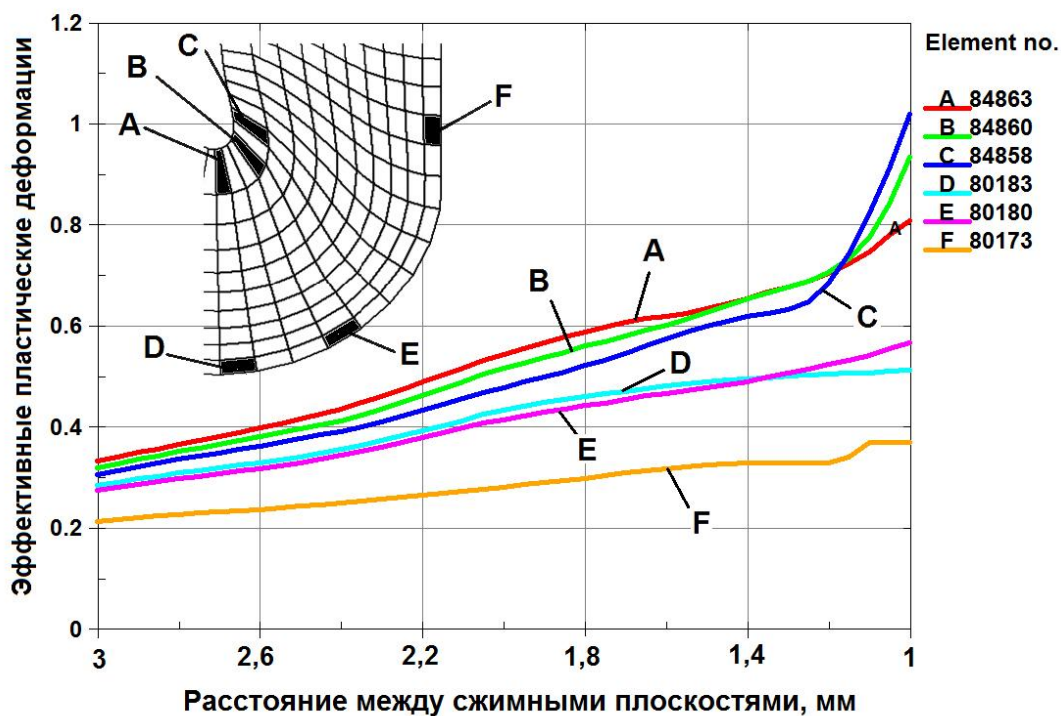


Рис. 7. Величина пластических деформаций по элементам от величины сжатия губок при формообразовании ЭДТ

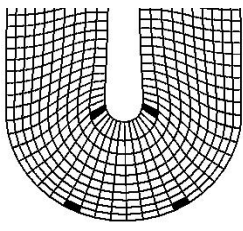
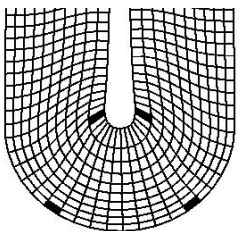
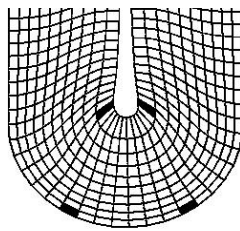
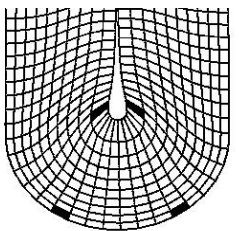
Из рисунка видно, что на начальных стадиях формообразования ЭДТ наибольшая деформация находится по биссектрисе угла зоны сгиба – элемент А по внутренней зоне сгиба и элемент D по наружной зоне сгиба. Но, начиная с величины сжатия плоскостей 1,25-1,3 мм происходит смещение максимальных деформаций сжатия с элемента А на элемент С и максимальной деформации растяжения с элемента D на элемент Е. Причиной смещения максимальных деформаций, является искажение формы ЭДТ (от формы окружности к более сложной форме) и воздействие деформации сжатия от сжимных плоскостей.

В таблице 2 приведены основные стадии процесса формообразования ЭДТ с геометрическими, деформационными и силовыми параметрами.

Таблица 2

Форма элемента двойной толщины в зависимости от величины сжатия плоскостей (мм) и значения усилия сжатия, величин наружного и внутреннего радиуса (мм) и зон расположения максимальных деформаций

$S_{\text{ЭДТ}} = 2$	$S_{\text{ЭДТ}} = 1,6$	$S_{\text{ЭДТ}} = 1,4$	$S_{\text{ЭДТ}} = 1,2$
$F_{\text{сж}} = 287 \text{ Н}$	$F_{\text{сж}} = 428 \text{ Н}$	$F_{\text{сж}} = 605 \text{ Н}$	$F_{\text{сж}} = 875 \text{ Н}$

$\varepsilon_{\max}^{\text{нар}} = 0,44$	$\varepsilon_{\max}^{\text{нар}} = 0,48$	$\varepsilon_{\max}^{\text{нар}} = 0,5$	$\varepsilon_{\max}^{\text{нар}} = 0,53$
$\varepsilon_{\max}^{\text{вн}} = 0,55$	$\varepsilon_{\max}^{\text{вн}} = 0,62$	$\varepsilon_{\max}^{\text{вн}} = 0,66$	$\varepsilon_{\max}^{\text{вн}} = 0,72$
$R^{\text{нар}} = 0,807$	$R^{\text{нар}} = 0,726$	$R^{\text{нар}} = 0,686$	$R^{\text{нар}} = 0,632$
$R^{\text{вн}} = 0,278$	$R^{\text{вн}} = 0,208$	$R^{\text{вн}} = 0,166$	$R^{\text{вн}} = 0,126$
			
$S_{\text{ЭДТ}} = 1,15$	$S_{\text{ЭДТ}} = 1,1$	$S_{\text{ЭДТ}} = 1,05$	$S_{\text{ЭДТ}} = 1$
$F_{\text{сж}} = 985 \text{ Н}$	$F_{\text{сж}} = 1069 \text{ Н}$	$F_{\text{сж}} = 1235 \text{ Н}$	$F_{\text{сж}} = 1318$
$\varepsilon_{\max}^{\text{нар}} = 0,53$	$\varepsilon_{\max}^{\text{нар}} = 0,54$	$\varepsilon_{\max}^{\text{нар}} = 0,56$	$\varepsilon_{\max}^{\text{нар}} = 0,57$
$\varepsilon_{\max}^{\text{вн}} = 0,75$	$\varepsilon_{\max}^{\text{вн}} = 0,83$	$\varepsilon_{\max}^{\text{вн}} = 0,91$	$\varepsilon_{\max}^{\text{вн}} = 1,05$
$R^{\text{нар}} = 0,619$	$R^{\text{нар}} = 0,605$	$R^{\text{нар}} = 0,589$	$R^{\text{нар}} = 0,573$
$R^{\text{вн}} = 0,113$	$R^{\text{вн}} = 0,096$	$R^{\text{вн}} = 0,072$	$R^{\text{вн}} = 0,049$

На рис. 8 приведен график зависимости усилия со стороны сжимных плоскостей при формообразовании ЭДТ, а также результаты замеров усилия, полученные в результате экспериментальных исследований в работе [3] (данные усилия пересчитывались под ширину заготовки 4 мм).

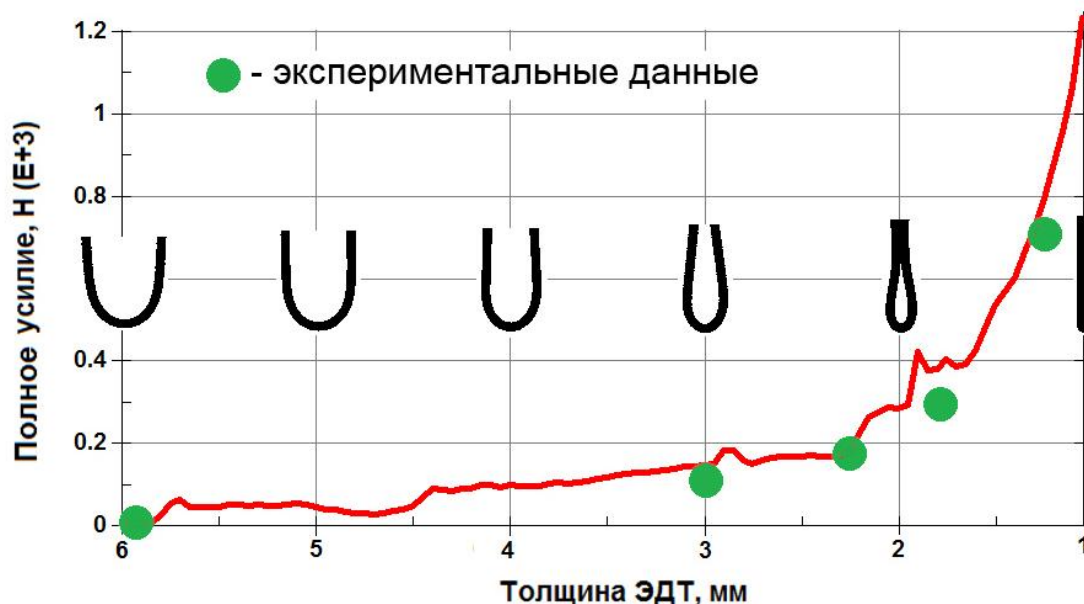


Рис. 8. График зависимости усилия сжатия при формообразовании ЭДТ и форма ЭДТ от расстояния между плоскостями $S_{\text{ЭДТ}}$ при моделировании процесса, и экспериментальные данные

На графике видно, что с уменьшением расстояния между сжимными плоскостями усилие сжатия увеличивается. Особенно усилие возрастает в конце сжатия.

Проведенные исследования по формообразованию элемента двойной толщины особенно актуальны при изготовлении из материала с предварительно нанесенным покрытием. Это связано с тем, что согласно данным производителей [5], ни одно из представленных на рынке покрытий листового материала не выдерживает деформирование при образовании ЭДТ на величину $2S$ (табл. 3). Минимальная величина изгиба, которую разрешают производители такого материала, составляет $0,5T$ (по методу изгиба “Т”).

Таблица 3

Минимальная величина изгиба “Т” листового материала с покрытием

Полиэфир	Матовый полиэфир	Полиуретан	Пластизоль
1,5Т	2Т	0,5Т	0,5Т

Из покрытий, которые способны выдерживать наибольшую деформацию при формообразовании ЭДТ, можно отметить полиуретановое и пластизоловое покрытие. Поэтому, в экспериментальных исследованиях рассматривались именно эти покрытия.

Исследования состояли в изучении состояния наружного покрытия при деформировании материала в элемент двойной толщины. Для выполнения деформирования использовали методы испытания на изгиб №2 и №3.

Характеристики исследуемых покрытий приведены в таблице 4, результаты исследования в табл. 5.

Таблица 4

Характеристики покрытий исследуемых материалов

Название покрытия	Цвет покрытия по RAL	Цвет покрытия	Толщина материала (общая), мм	Толщина покрытия, мкм
Пластизоловое (текстура под дерево)	8017	Черный	0,7	100
	6002	Зеленый	0,7	100
Полиуретановое	3011	Красный	0,7	50
	6005	Зеленый	0,65	50

Таблица 5

Результаты исследования нарушения покрытия при формообразовании ЭДТ

Покр	Цвет по RAL	Метод исследования		Характеристика покрытия ЭДТ
		Изгиб "Т", параметр Т	Обкатка в роликах, толщина ЭДТ (мм)	
Пластизоловое	8017	2,5Т	4,4	без нарушений
		2Т	4	без нарушений
		1,5Т	3,5	без нарушений
		1Т	3	без нарушений
		0,5Т	2,2	без нарушений
		-	1,8	без нарушений
		0Т	1,4	без нарушений
	6002	2,5Т	4,4	небольшие трещины
		2Т	4	небольшие трещины
		1,5Т	3,5	трещины
		1Т	3	трещины
		0,5Т	2,2	трещины и небольшие оголенные участки на глубине покрытия до 80% на (2-3)% поверхности
		-	1,8	трещины, ячеистая структура и оголенные участки на глубине покрытия до 90% на 10% поверхности
		0Т	1,4	трещины, ячеистая структура и оголенные участки на глубине покрытия до 90% на 10% поверхности
полиуретановое	3011	2,5Т	4,4	небольшие трещины
		2Т	4	трещины
		1,5Т	3,5	трещины
		1Т	3	трещины и небольшие оголенные участки до металла на (2-3)% поверхности
		0,5Т	2,2	трещины и небольшие оголенные участки до металла на 5% поверхности
		-	1,8	трещины, ячеистая структура и оголенные участки до металла на 10% поверхности
		0Т	1,4	трещины, ячеистая структура и оголенные участки до металла на 10% поверхности
	6005	2,5Т	4,4	без нарушений
		2Т	4	без нарушений
		1,5Т	3,5	без нарушений
		1Т	3	без нарушений
		-	2,2	без нарушений
		0,5Т	1,8	еле заметные точки разрыва на поверхности покрытия
		0Т	1,4	практически без нарушений

В результате было выявлено, что один и тот же вид покрытия может по-разному выдерживать деформацию на изгиб. Например, материал с пластизолевым покрытием RAL 8017 выдерживает все деформации на изгиб без визуального нарушения сплошности покрытия, т.е. соответствует 0Т, а пластизолевое RAL 6002 показало наличие трещин при толщине ЭДТ (4,4 мм), т.е. по методу изгиба “Т” не менее 3Т. Неравномерность свойств характерно и для полиуретанового покрытия. Для покрытия полиуретан RAL3011 деформация без нарушения сплошности покрытия составляет не менее 3Т, а для RAL 6005 1Т.

Среди характерных дефектов наружного слоя покрытия, при деформировании, в элемент двойной толщины можно отметить дефект в виде трещин (рис. 9а) и ячеистой структуры. При этом, дефект ячеистой структуры проявляется на этих покрытиях также по-разному. Для сравнительно толстого пластизолевого покрытия дефект может распространяться не на всю толщину покрытия, в то время как для полиуретанового покрытия характерно распространение дефекта сразу до грунтового слоя подложки.

Также было выявлено, что для пластизолевого и полиуретанового покрытия характерно сильное влияние релаксационных свойств в отличие, для примера, от тонких полиэфировых покрытий (толщиной 10-20 мкм). Данные свойства могут проявляться двояко. Для полиуретанового покрытия RAL 6005 характерен процесс “залечивания трещин”, где с течением времени или при последующей деформации происходит процесс затягивания трещин. Например, при толщине ЭДТ 1,8 мм выявлены точки разрыва на покрытии (рис. 9б), а при дальнейшем обжатии до 1,4 мм эти дефекты уже не выявлены (см. табл.5).

Характерно и наличие обратного релаксационного процесса. Например, на пластизольном покрытии RAL 6002 сразу после деформации возникло 10% нарушение площади поверхности образца, а с течением времени дефект увеличился до 50% (рис. 9в).

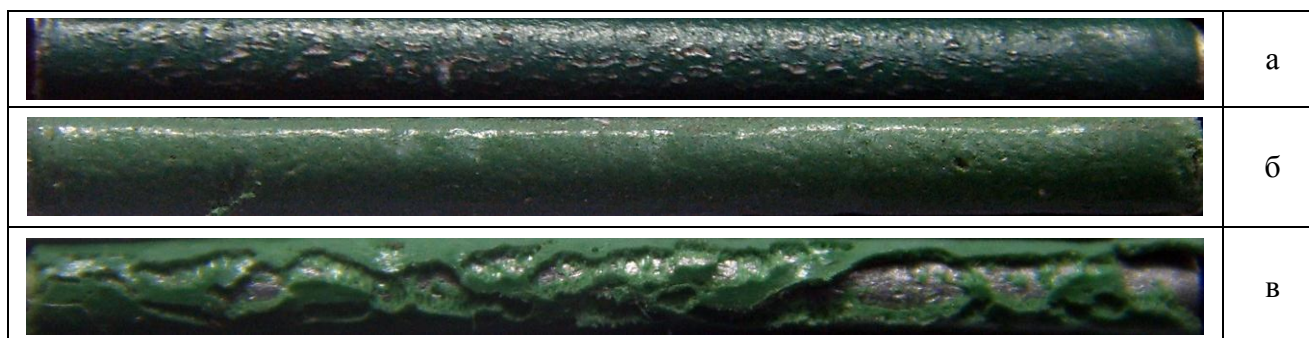


Рис. 9. Нарушение покрытия на наружной части ЭДТ: а – трещины на покрытии, б – точки разрыва на поверхности полиуретанового покрытия, в – разрывы на пластизолевом покрытии RAL 6002 с течением времени

Выводы:

1. Рассмотрены существующие методы испытания материала на изгиб, данные методы были использованы для моделирования процесса образования элемента двойной толщины и в практическом испытании.

2. Моделирование процесса формообразования на элемент двойной толщины позволило выявить картину распределения деформации, показать зоны максимальных деформации и их смещение по сечению в зависимости от величины сжатия, а также показать искажение формы конечных элементов по сечению ЭДТ.
3. Усилие сжатия при формообразовании ЭДТ резко увеличивается на заключительных этапах деформирования. Моделирование и практика показали сходные результаты. Значительные усилия могут вызывать нарушение покрытия в местах контакта с сжимными плоскостями.
4. Характерно различие свойств покрытия, даже в пределах одного типа, что может быть связано, как с различными условиями нанесения покрытия, так и с различным составом самого покрытия (или грунтового слоя).
5. Для пригодности покрытия к деформированию необходимо проведение предварительных испытаний на изгиб с определением минимального радиуса изгиба, при котором нарушение покрытия не выявляется.

Библиографический список

1. ГОСТ 30246–94. Прокат тонколистовой рулонный с защитно-декоративным лакокрасочным покрытием для строительных конструкций. Технические условия.
2. ГОСТ 14019–2003. Материалы металлические. Метод испытания на изгиб.
3. Илюшкин М.В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах / М.В. Илюшкин, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 200 с.
4. Илюшкин М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением (осадка цилиндрической заготовки) : учебно-методическое пособие / М.В. Илюшкин. – Ульяновск: УлГУ, 2013. – 112 с.
5. Лист с покрытиями: только красочное будущее // Metallургический бюллетень. – 2010. - №10. – с. 36-42.