

Математическое моделирование в программе LS-DYNA процесса изготовления гнутого профиля сложного типа интенсивным методом формообразования и подтверждение результатов теоретическими и практическими данными

Введение

1. Математическое моделирование процесса профилирования в программе LS-DYNA
2. Теоретические исследования процесса образования кромковой волнистости по краям профиля
3. Экспериментальные исследования процесса изготовления армирующего профиля
4. Сравнение результатов математического моделирования, теоретических расчетов и экспериментальных исследований.

Выводы

Введение

Применяемые в настоящее время методы изготовления гнутых профилей устарели и не отвечают требованиям, предъявляемым к технологии и оборудованию, а именно компактность, мобильность, быстропереоснащаемость такого оборудования и малый срок окупаемости данной технологии и оборудования.

Поэтому разработка новой технологии, которая отвечала бы этим требованиям, является актуальной задачей в настоящее время.

Переход от старой технологии к новой требует немалых финансовых вложений, большой теоретической и экспериментальной базы, где можно было набирать и анализировать накопленный материал и опыт. Все это может затягиваться на многие годы.

Выходом из этой ситуации может служить применение компьютерных программ, основанных на методе конечных элементов, которые способны с высокой точностью воспроизводить реальный технологический процесс. Для процессов обработки металлов давлением наиболее адекватным является моделирование процесса в LS-DYNA. Данная программа позволяет смоделировать практически любой процесс в обработке металлов давлением (ОМД).

Процесс профилирования является одним из сложных процессов в ОМД, в котором есть немало тонкостей. Все эти особенности позволяет учесть программа LS-DYNA при моделировании данного процесса.

В конечно-элементном моделировании в качестве объекта исследования был выбран профиль сложной конфигурации - профиль армирующий 40,5x27,5x1,5 (рис. 1).

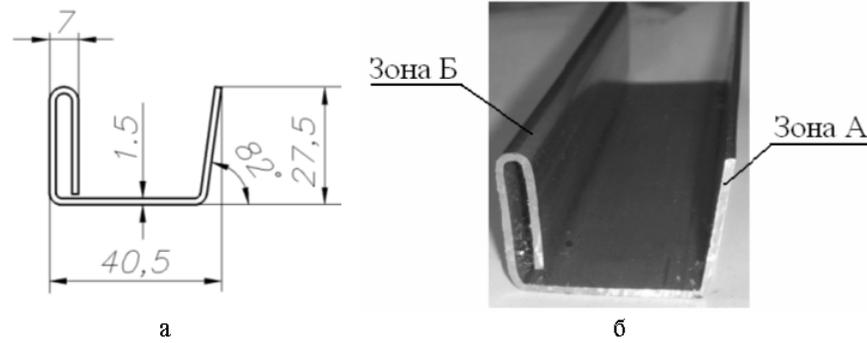


Рис. 1. Армирующий профиль - 40,5x27,5x1,5 (а – чертеж профиля, б – фотография профиля и исследуемые зоны)

Особенностью такого профиля является наличие дополнительной вертикальной полки Б, с помощью которой увеличивается жесткость профиля, но при возникают дополнительные сложности при его изготовлении.

Данный профиль изготавливается интенсивной схемой формообразования за 8 технологических переходов. Нужно отметить, что данное количество переходов является критическим к появлению дефекта кромочной волнистости, поскольку крайний элемент полки Б за время формования подгибается на 270^0 (!).

1. Математическое моделирование процесса профилирования в программе LS-DYNA

Для анализа возможности изготовления данного профиля за требуемое количество переходов использовали компьютерное моделирование методом конечных элементов. Для этих целей использовали программу LS-DYNA. Предварительно спроектированные восемь технологических переходов представляли средствами компьютерной графики в виде технологического инструмента - роликов и исходной плоской заготовки (рис. 2).

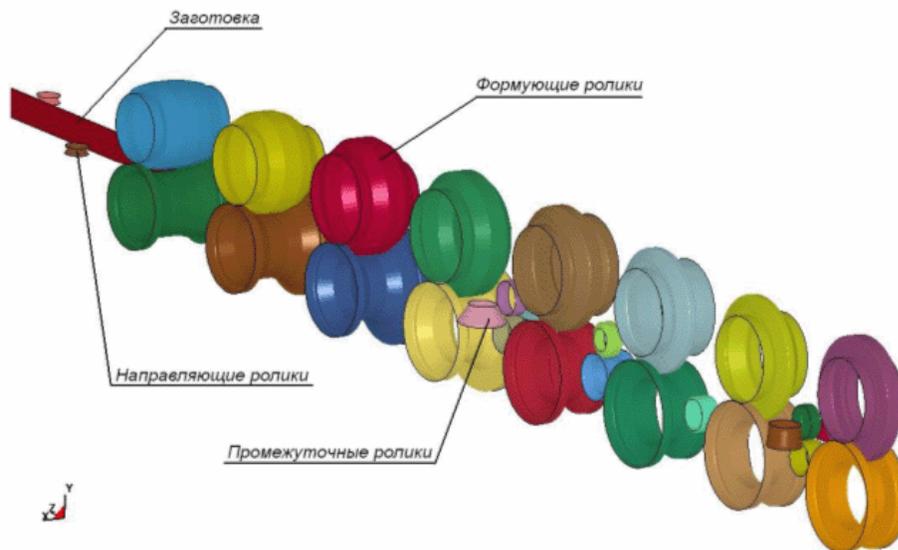


Рис. 2. Модель формообразующей, вспомогательной оснастки и исходной заготовки (8 пар роликовых калибров) для изготовления армирующего профиля

Параметры моделирования следующие: тип элемента - Shell 163 с одночечной редуцированной схемой интегрирования по плоскости с контролем Hourglass 4, модель материала: для профиля - билинейная изотропная модель (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) (табл. 1). Ролики задавались как абсолютно жесткие (Rigid) тела, КЭ сетка задавалась только на их поверхности, используя тип элемента Shell 163. Тип контактного элемента: заготовка - формирующие ролики - Forming surface-to-surface contact (FSTS), заготовка - направляющие и промежуточные ролики - Automatic surface-to-surface contact (ASTS).

Таблица 1

Характеристики материала заготовки (сталь 08 кп)

Плотность, т/м ³	7,85e-9
Модуль Юнга, МПа	2e5
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести, МПа	250
Касательный модуль, МПа	420

Конечно-элементная модель (рис. 3) включала в себя 9600 оболоченных элементов на исходной заготовке и роликовом инструменте.



Рис. 3. Конечно-элементная модель роликов и заготовки.

Формоизменение заготовки методом конечных элементов осуществляли следующим образом. Заготовка в виде полосы длиной 900 мм, шириной, равной ширине развертки, 112,72 мм поступала в первый переход, при этом верхний формирующий ролик был поднят на 5 мм. На ролики задавались угловые скорости, соответствующие направлению проката. Движение полосы через калибры происходило под воздействием сил трения, возникающих в процессе подгибки элементов полок, что полностью соответствует реальному процессу.

Заготовку продвигали на 3 мм перпендикулярно оси симметрии роликов для более надежного и качественного захода в калибр. Через заданное время (0,005 с) ролики начинали вращаться, при этом верхний ролик также начинал опускаться (время перемещения верхнего ролика составлял 0,01 с), приводя в движение заготовку и образуя сечение профиля в соответствии с калибром. Заготовка под воздействие сил трения начинала перемещаться по направляющим роликам, проходя через четыре первых перехода. Между четвертым и пятым переходами установлены промежуточные ролики, которые предварительно подгибали боковые полки, а также придерживали профиль (для исключения прогиба по донной части профиля). Зайдя в пятый переход, заготовка деформировалась, образуя сечение в соответствии с заданным калибром, при этом промежуточные (боковые) ролики расходились, освобождая заготовку.

Аналогичное формообразование заготовки осуществлялось и на остальных формующих переходах.

По результатам моделирования было проанализировано поведение заготовки между переходами на предмет образования кромковой волнистости (рис. 4), а также построены сечения профиля по переходам (рис. 5).

Наибольшие деформации сосредоточены с левого (по направлению движения) края профиля в зоне Б (рис.1.) (точка А 49303 рис. 6), вследствие больших углов подгибки. На графике (рис. 6) явно выражены резкие скачки величин деформаций, что соответствует прохождению заготовки по переходам, при этом превышает предел перехода в пластическое состояние (0,002), который вызывает остаточную деформацию по левому краю профиля который и вызывает дефект кромковой волнистости. По правому краю, в зоне А (рис. 1), величина деформации соответствует упругой зоне, т.е. отсутствуют остаточные деформации (точка D).

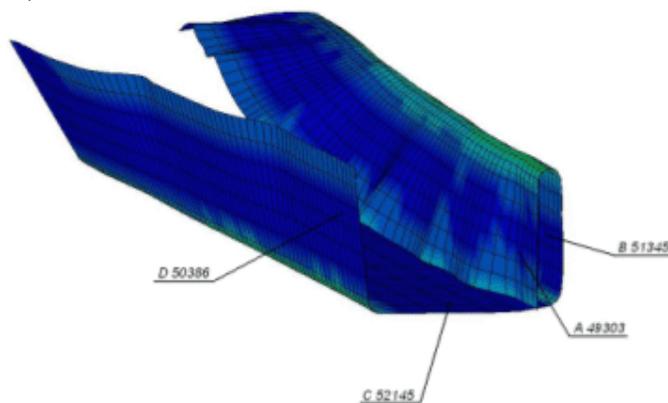


Рис. 4. Исследуемые зоны для установления величин продольных деформаций

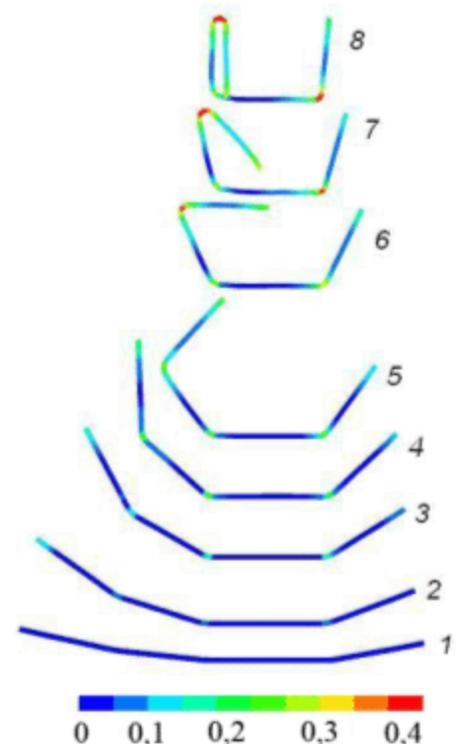


Рис. 5. Этапы изготовления армирующего профиля. Распределение пластических деформаций по сечению профиля

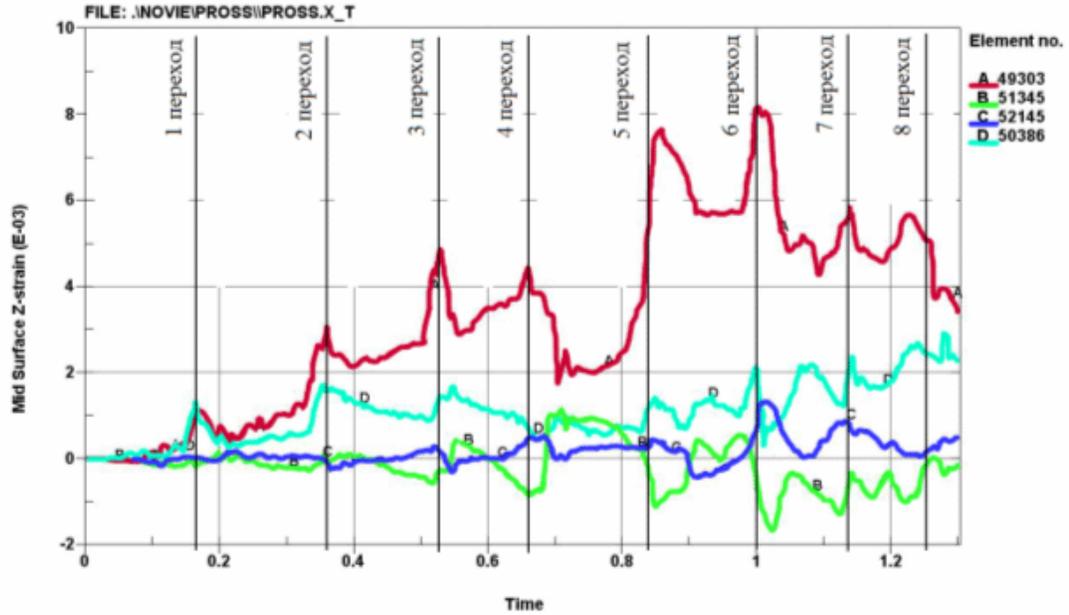


Рис. 6. Графики распределения продольных деформаций на различных участках профиля при прохождении формирующих переходов

Кроме того, на выходе из калибра пятого перехода в процессе моделирования, наблюдали образование дефекта волнистости на кромке профиля, вследствие больших углов подгибки между переходами ($\alpha_{\max} = 54^\circ$). По графику это соответствует возрастанию продольных деформаций до 0,8% (Time = 0,85 с), который подтверждает переход в зону действия пластических остаточных деформаций.

На рис. 7. изображено появление дефекта кромковой волнистости на 5-8 переходах.

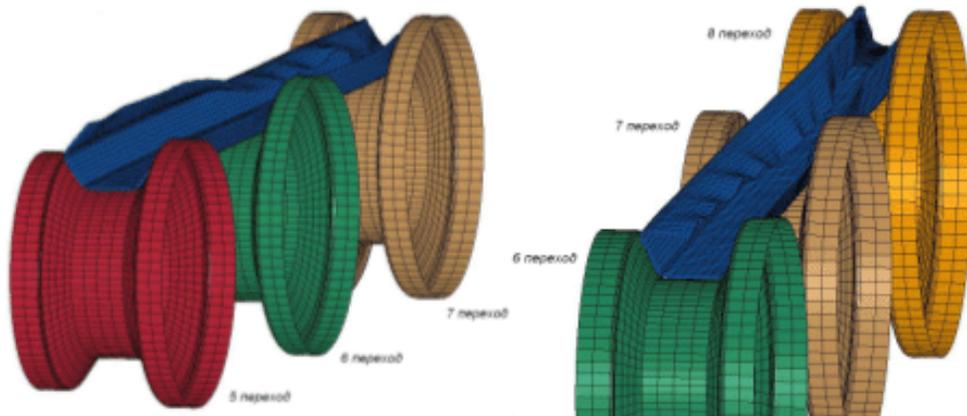


Рис. 7. Дефект кромковой волнистости на 5-8 переходах.

Результаты моделирования позволили предсказать форму готового профиля, вероятность возникновения дефекта кромковой волнистости и наличие скрутки профиля в результате различия деформаций по полкам профиля.

2. Теоретические исследования процесса образования кромковой волнистости по краям профиля

Полученные значения деформаций при математическом моделировании проверяли в теоретическом расчете. Для этого воспользовались формулой Чанга, позволяющей определить величину продольных деформаций по краям профиля в зависимости от толщины исходной заготовки, высоты полки и угла подгибки.

Для определения величины продольных деформаций по краям профиля использовали формулу Чанга:

$$e_{\text{прод}} = \sqrt{1 + \frac{3 \cdot s}{4 \cdot b \cdot a} \cdot (1 - \cos a)} - 1 \quad (1)$$

где s – толщина профиля;

b – высота полки профиля;

a – разница углов подгибки между текущим и предыдущим переходами.

По данной формуле были построены графики зависимостей продольных деформаций от угла подгибки и величины подгибаемой полки (рис. 8).

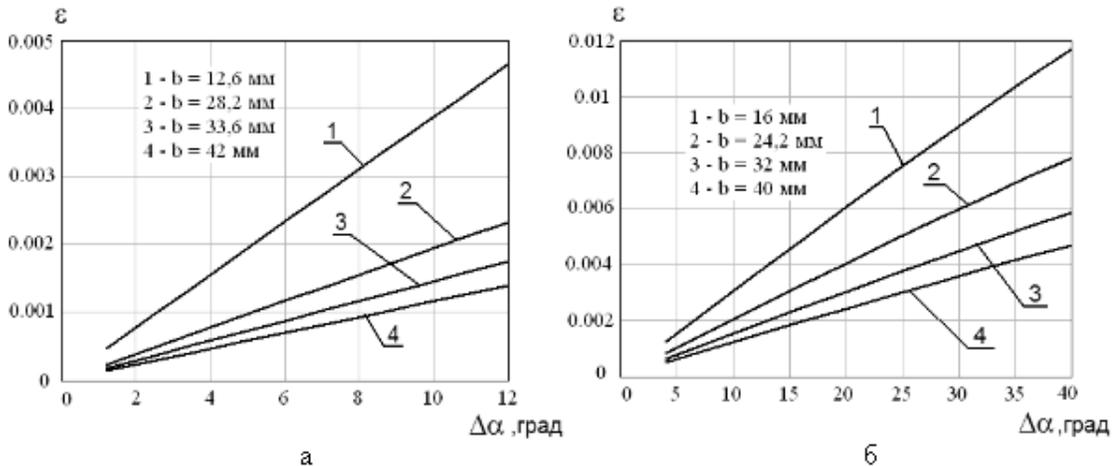


Рис. 8. Зависимость продольной деформации от высоты полки и углов подгибки: а - зона А, б - зона Б

Как показывают графики на рис. 8, величина продольных деформаций возрастает с увеличением угла подгибки при уменьшении высоты полки профиля. При этом величина деформаций в зоне Б (рис. 8.б), превышает деформации в зоне А в 2,5 - 3 раза и одновременно превышает уровень перехода в пластическое состояние (0,002), что приводит как к возникновению скрутки профиля, так и возникновению дефекта кромковой волнистости по полки Б.

Величина продольных деформаций, вычисленные по формуле (1), приведена на рис. 9.



Рис. 9. Величина продольных деформаций по краям полок профиля

Как видно по диаграмме величина продольных деформации по полке А практически не превышает предела упругости, т.е. остаточные пластические деформации по данной полке будут отсутствовать, в результате дефект кромковой волнистости на данной полке наблюдаться не должен. Продольные деформации по полке Б на первых переходах практически соответствуют данному пределу, однако начиная с пятого, а особенно с шестого перехода данные деформации значительно возрастают, в результате чего по данной полке будет присутствовать остаточная пластическая деформация которая и вызовет образования дефекта кромковой волнистости.

3. Экспериментальные исследования процесса изготовления армирующего профиля

Для подтверждения адекватности теоретической и конечно-элементной модели в ОАО “Ульяновский НИАТ” были произведены экспериментальные исследования изготовления данного профиля по рассматриваемой технологической схеме. Данный профиль был испытан на гибочно-прокатном станке ГПС-350М8 (рис. 10), с технической характеристикой, указанной в таблице 2. В ходе испытания фиксировались наличие или отсутствие дефекта кромковой волнистости. При наличии дефекта фиксировали амплитуду (А) и период (Т).

Таблица 2

Технические характеристики станка ГПС-350М8

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1.	Число клеток, шт	8
2.	Межклетьевое расстояние, мм	400
3.	Межосевое расстояние, мм	120...160
4.	Диаметр рабочих валов, мм	65
5.	Базовые диаметры роликов, мм	90
6.	Скорость профилирования, м/мин	18
7.	Вспомогательные устройства: направляющее и правильное, шт.	4



Рис. 10. Профилировочный станок ГПС-350М8 с экспериментальной оснасткой для изготовления армирующего профиля 40,5x27,5x1,5

Дефект кромковой волнистости был выявлен на 6, 7 и 8 переходах (рис. 11) по зоне Б.

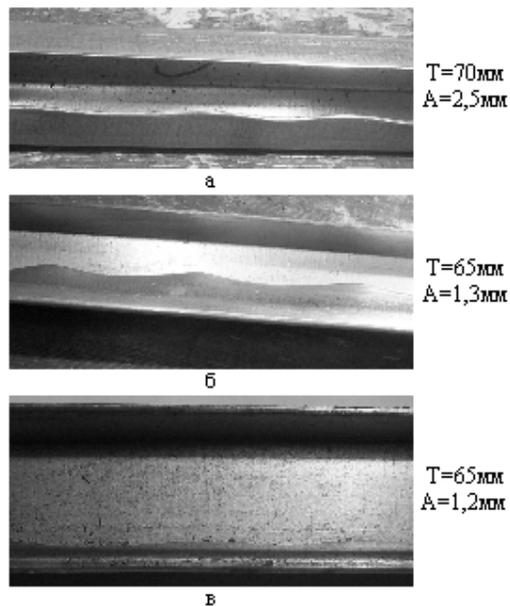


Рис. 11. Кромковая волнистость по зоне Б на 6 - ом (а), 7 - ом (б) и 8 - ом (в) переходах и ее параметры (Т - период волны, А - амплитуда).

Для определения величин остаточных продольных деформаций использовали следующую формулу:

$$\varepsilon = \left(\frac{\pi \cdot A}{T} \right)^2 \cdot 100,$$

где А - амплитуда, Т - период.

Полученные значения продольных деформаций на кромке профиля по зоне Б приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения продольных деформаций для армирующего профиля на полке Б

Этап испытания	№ перехода	Продольные деформации, %
Предварительное испытание	6	0,65
	7	0,4
	8	0,62

4. Сравнение результатов математического моделирования, теоретического расчета и экспериментального исследования

Весьма важным является сравнение 3-х используемых моделей: математической, теоретической и практической.

Сравнение проводили по нескольким параметрам:

- по величинам продольных деформаций (для всех 3-х моделей);
- по наличию и форме дефекта кромковой волнистости (для математической и практической модели).

Результаты сравнения приведены на рис. 11. Как показывает сравнение величины деформаций отличаются не более чем на 20-30% (кроме 5-го перехода), что является вполне приемлемым, если учесть, что для всех 3-х моделей были приняты различные допущения.

Сравнение формы и величины гофра для практики и математического моделирования имеют практически одинаковый вид и форму, что подтверждает хорошую визуальную сопоставимость моделирования и практики.

Небольшие отклонения по форму гофры и отличия по величине деформаций выявлено только на 5-м переходе. Это может быть связано как с вероятностной жесткостью полки при положении близкой к вертикальному, так и с ошибкой измерения.

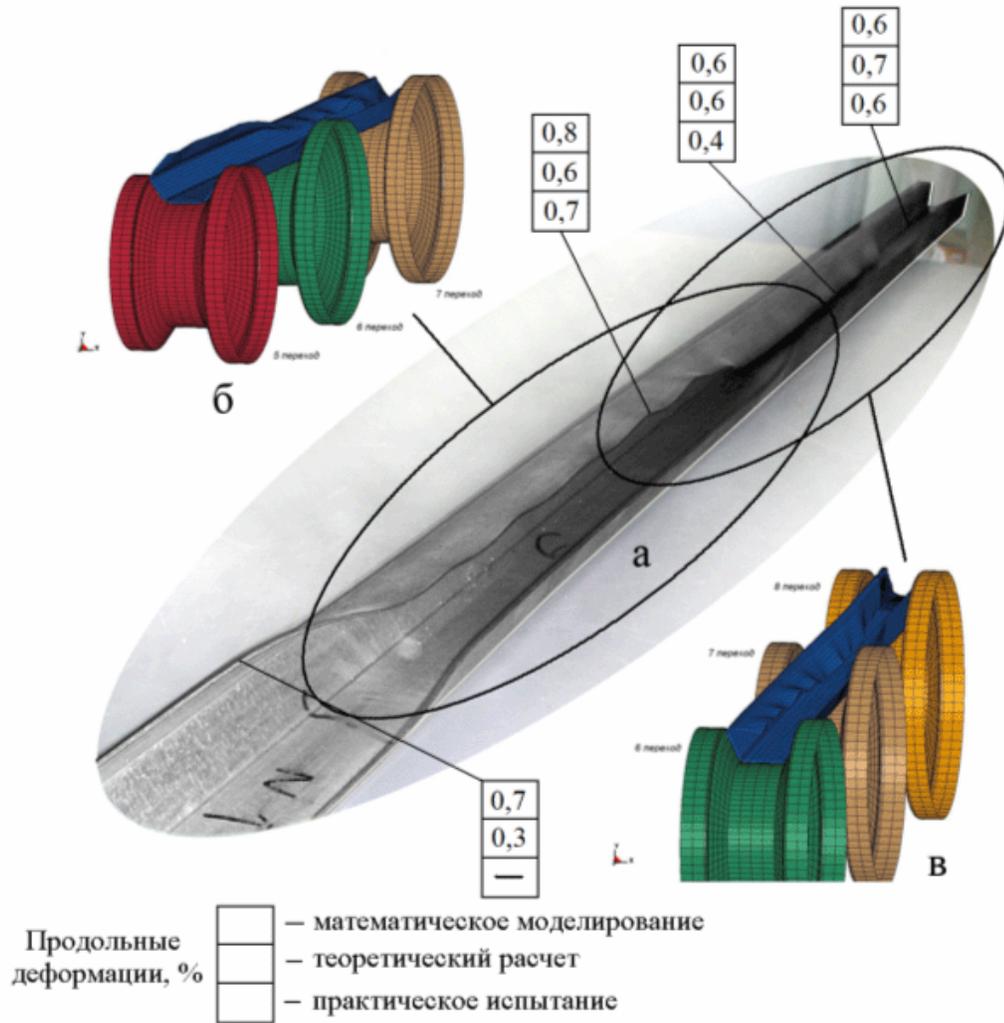


Рис. 12. Кромковая волнистость левого края профиля при моделировании и практическом испытании и величины продольных деформаций для 3-х методов исследования профиля: а – профиль полученный практически, б – математическая модель на 5-7 переходах, в - математическая модель на 6-8 переходах

Выводы

Проведенные исследования подтвердили возможность использования средств математического моделирования для решения сложных задач пластического деформирования в процессах обработки металлов давлением.