

Численное моделирование процесса формообразования профиля на четырехвалковом листогибочном станке

© М.Э. Ахмед Солиман, Д.А. Чинахов, Н.В. Курлаев

Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, 630073, Российская Федерация

Рассмотрен процесс формообразования швеллерного профиля из стальной листовой заготовки на четырехвалковом листогибочном стане. Для его реализации применено численное моделирование на основе метода конечных элементов, использованного в программном комплексе LS-DYNA. Построена трехмерная математическая модель взаимодействия заготовки с формующими роликами, учитывающая контактные условия, упругопластическое поведение материала, нелинейные свойства стали и последовательность технологических переходов. Эта модель дает возможность проследить за динамикой формирования профиля, выявить зоны локального концентрационного нагружения, оценить эффект кумулятивной пластической деформации и проанализировать влияние углов формовки, межвалкового расстояния и толщины листа на распределение напряжений и деформаций. В данной работе экспериментальная верификация не рассматривается; основной акцент сделан на разработке и анализе численной методики прогнозирования процесса формообразования швеллерных профилей. Для анализа риска дефектообразования и оценки предельного состояния материала был проведен FLD-анализ, позволяющий определить безопасные зоны деформации и зоны потенциального разрушения без необходимости физического эксперимента. В результате численного моделирования получены детальные поля эквивалентных напряжений, продольных и поперечных деформаций, рассчитаны изменения геометрических параметров профиля на каждом этапе формовки, а также выполнено сопоставление расчетных деформаций с кривой предельных деформаций на FLD-диаграмме. Анализ влияния ключевых технологических параметров на равномерность деформации и минимизацию концентраций напряжений позволяет оптимизировать последовательность формовочных переходов и параметры роликового инструмента. Разработанная численная модель помогает не только сделать прогноз геометрии готового профиля, но служит расчетной методической основой для планирования технологических процессов холодной профильной прокатки.

Ключевые слова: холодная профильная прокатка, продольные и осевые деформации листового материала, численное моделирование методом конечных элементов, диаграмма предельных деформаций, эквивалентные напряжения по фон Мизесу, оптимизация технологических параметров формовки

Введение. Исследование напряженно-деформированного состояния и дефектов, формирующихся в процессе профилирования листового металла, вызывает значительный научный и практический интерес. Актуальность данной проблемы обусловлена прямым влиянием остаточных напряжений и локальных деформаций на эксплуатационные характеристики конечного изделия, включая точность геометрических параметров, несущую способность и долговечность конструкций.

Пластическая деформация, лежащая в основе процесса формовки, приводит к образованию зон локальных напряжений, которые могут проявляться в виде прогибов, повышенной пружинности и отклонений размеров готового профиля. Совокупное действие этих факторов напрямую влияет на качество и эксплуатационные показатели изделий.

Особую сложность представляет профилирование новых марок стали и алюминиевых сплавов, свойства которых отличаются от свойств эталонных материалов, что требует точной настройки параметров формовки. В современных исследованиях эти задачи решаются с помощью численного моделирования МКЭ, позволяющего учитывать сложное контактное взаимодействие заготовки с формирующими роликами, нелинейные упругопластические свойства материала и кинематику процесса [1–5].

Адекватность математической модели обеспечивается комплексным учетом основных технологических и геометрических параметров, включая конфигурацию и взаимное положение валков, толщину исходной заготовки, скорость подачи материала, а также трибологические условия в зоне контакта. Для повышения точности расчетов в областях локальной концентрации напряжений применяется адаптивное измельчение конечно-элементной сетки.

Для оценки предельного состояния материала и выявления потенциальных дефектов используется диаграмма предельных деформаций (FLD), помогающая определить безопасные зоны деформации и зоны риска разрушения. Применение МКЭ в сочетании с FLD-анализом позволяет перейти от эмпирического подбора режимов формовки к расчетному прогнозированию устойчивости процесса, что особенно важно при проектировании новых профилей.

Цель работы — разработка высокоточной численной модели поэтапной формовки листовой заготовки, позволяющей прогнозировать пространственное напряженно-деформированное состояние, распределение эквивалентных напряжений и деформаций, изменения геометрических параметров профиля на всех этапах формообразования, а также формировать расчетную методику оценки штампуемости материала и устойчивости процесса формовки с использованием диаграммы предельных деформаций (FLD).

Для анализа и прогнозирования напряженно-деформированного состояния листового материала при формообразовании швеллерного профиля применяются современные численные методы. Это обеспечивает возможность оптимизации параметров формовки и последовательность переходов с целью минимизации дефектов и повышения точности профиля, что особенно важно при внедрении новых материалов с отличающимися свойствами.

Математическая модель процесса гибки листового металла.

Система координат и конфигурация деформированной нейтральной (срединной) поверхности листового материала в межвалковом пространстве прокатного стана приведены на рис. 1. Геометрия нейтрального слоя характеризуется пространственной кривизной, возникающей в результате последовательного поэтапного формообразования. Дискретизация нейтральной поверхности для численного анализа показана на рис. 1, а.

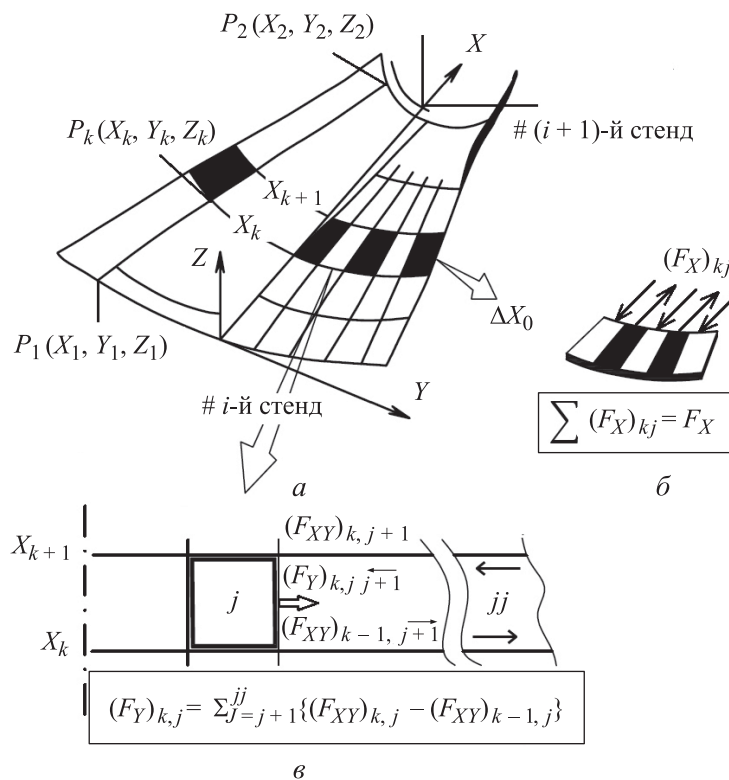


Рис. 1. Расчетная схема с системой координат и конфигурация деформированной нейтральной поверхности листа между клетями прокатного стана:

а — деформированная криволинейная поверхность; б — равновесие продольной силы; в — равновесие поперечной силы

Основным объектом моделирования является ленточный элемент, формируемый сечением заготовки плоскостями, нормальными к направлению прокатки (ось X). Траектория движения каждого из элементарных участков строго следует нейтральному слою между формирующими роликами i и $(i+1)$. Для обеспечения баланса сил в продольном направлении предусмотрено изменение длины элемента ΔX , которое описывается зависимостью

$$\Delta X_{\text{тек}} = \Delta X_{\text{нач}} + \Delta L, \quad (1)$$

где $\Delta X_{\text{тек}}$ — длина элемента в текущий момент времени; $\Delta X_{\text{нач}}$ — исходная длина элемента; ΔL — величина удлинения или укорочения элемента.

Расчетная схема с системами координат и вид деформированной нейтральной поверхности листа на участке между клетями прокатного стана показаны на рис. 1, б и в. Принята такая система координат, что ее ось X направлена вдоль движения заготовки, а позиции формирующих роликов i и $(i+1)$ заданы координатами X_1 и X_2 соответственно. Пространственную конфигурацию нейтрального слоя на участке между роликами описывает система параметрических уравнений [6–8]:

$$\begin{cases} X = X(x, y); \\ Y = Y_1(y) + [Y_2(y) - Y_1(y)]S_y(X); \\ Z = Z_1(y) + [Z_2(y) - Z_1(y)]S_z(X), \end{cases} \quad (2)$$

где $S_y(X)$ и $S_z(X)$ — функции, которые задают закон изменения формы нейтрального слоя в продольном направлении и позволяют аппроксимировать сложную пространственную конфигурацию деформируемого материала.

Эти функции определяются следующим образом [9–11]:

$$\begin{cases} S_y(X) = \sin \left[(\pi/2) (X^*/L)^{n_y} \right]; \\ S_z(X) = \sin \left[\sin \{ (\pi/2) (X^*/L)^{n_z} \} \right], \end{cases} \quad (3)$$

где

$$X^* = X - X_1, \quad L = X_2 - X_1.$$

Здесь X^* — локальная координата от первого ролика; L — длина участка между роликами; n_y и n_z — параметры, определяющие пространственную конфигурацию линий тока, значения которых выбираются из условия минимизации полной энергии деформации листа на участке между роликами, что соответствует энергетическому подходу к решению задачи.

В основе вычислительной модели лежит принцип движения материала по нейтральному слою, пространственная конфигурация которого задается системой уравнений (3). Для определения полей продольных и поперечных деформаций, изгибных деформаций и соответствующих напряжений применяется поэтапный инкрементальный алгоритм, основанный на теории пластичности и законах силового равновесия.

Кинематика процесса описывается уравнениями равновесия для каждого конечного элемента в продольном (X) и поперечном (Y) направлениях.

Разработанная математическая модель реализует расчетную методику, включающую следующее:

- задание геометрии формирующих роликов и последовательности технологических переходов;
- численный расчет полей напряжений, деформаций и утонения стенки;
- определение зон локализации пластического течения;
- сопоставление расчетных деформаций с FLD-диаграммой;
- оценку устойчивости процесса формообразования без проведения физического эксперимента.

Предлагаемая методика численного моделирования процесса формообразования состоит из шести этапов: задание геометрии профиля и валков; построение МКЭ-модели заготовки и инструмента; поэтапное моделирование технологических переходов; анализ напряженно-деформированного состояния и утонения материала; сопоставление расчетных деформаций с диаграммой предельных деформаций (FLD); оценку устойчивости процесса; корректировку параметров формовки.

Численное моделирование процесса формообразования на четырехвалковом станке. Рассмотрим получение швеллерного профиля высотой $H = 60$ мм с шириной полок $B = 50$ мм и номинальной толщиной стенки $t = 3$ мм, соответствующего требованиям промышленного профилирования. Процесс холодной профильной прокатки, показанный на рис. 2, реализуется в четыре технологических перехода, в ходе которых исходная плоская заготовка размерами 1580×124 мм с фаской на переднем крае и толщиной 3 мм преобразуется в готовый швеллерный профиль. Этот процесс с геометрической точки зрения является сложным, поскольку пластическая деформация материала развивается не только в зонах непосредственного контакта с валками, но и на участках между стендами прокатного стана.

При проектировании прокатной оснастки самое важное — определить оптимальное количество технологических переходов, которое зависит от геометрической сложности целевого профиля, установленных допусков, толщины исходного материала и механико-технологических характеристик металла (предела текучести и относительного удлинения).

Приводная система реализована по принципу встречного вращения шпинделей (параллельная кинематика), что обеспечивает равномерное деформирование материала по всей ширине полосы и минимизацию локальных концентраций напряжений. Каждый из четырех стенов состоит из верхнего и нижнего роликов, вращающихся

в противоположных направлениях, благодаря чему можно формировать профиль поэтапно, контролируя распределение деформаций и исключая проскальзывание заготовки. Первые два станда играют роль питающего устройства, обеспечивая равномерное поступательное движение полосы, а последующие два — непосредственно формируют геометрию швеллера.

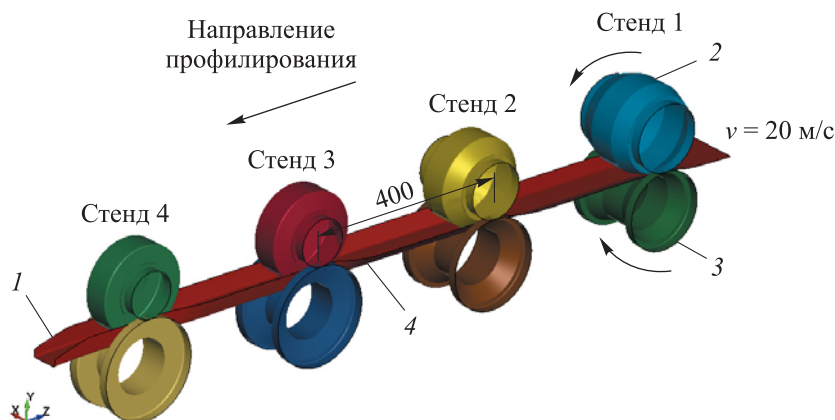


Рис. 2. Численное моделирование процесса формообразования швеллерного профиля в LS-DYNA: четырехклетевой листогибочный станок, каждый станд которого состоит из двух роликов (верхнего и нижнего), вращающихся в противоположных направлениях, обеспечивая последовательное поэтапное формирование профиля от плоской заготовки до готового швеллера:

1 — фаска; 2 — верхний ролик; 3 — нижний ролик; 4 — деформирующая полоса из стали 45

Для моделирования процесса применен МКЭ с использованием оболочечных конечных элементов (SHELL) толщиной 3 мм, что позволяет адекватно описывать упругопластическое поведение листового материала при изгибе и растяжении. Скорость движения заготовки через валки установлена равной 20 м/с, что обеспечивает корректную кинематическую постановку задачи и реалистичное распределение деформаций по ширине полосы.

Такая модель дает возможность осуществлять численный расчет пространственного распределения напряжений и деформаций, локальных зон концентрации эквивалентных напряжений фон Мизеса, динамики формирования профиля на каждом технологическом переходе, а также протяженности и величины зон пластического течения.

Вычислительный эксперимент начинается с имитации начального состояния недеформированной металлической полосы, после чего проводится пошаговый анализ всех технологических переходов. Моделирование охватывает полный цикл деформирования, включая четыре последовательные стадии формования, и завершается получением готового профиля с заданными геометрическими параметрами. На каждом

из переходов проводится оценка суммарной пластической деформации и упругой составляющей в крайней точке фланца. Для того чтобы количественно описать деформационное состояние, применяется эквивалентная деформация по фон Мизесу:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}, \quad (4)$$

где σ_x, σ_y — нормальные напряжения; τ_{xy} — касательное напряжение.

Дискретизация полосы (из стали 45) выполнена с использованием оболочечных конечных элементов на основе теории Кирхгофа — Лява, размер ячеек сетки составляет 10×10 мм. Для описания пластического поведения материала применена модель с кубической сплайновой аппроксимацией диаграммы деформирования:

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n, \quad (5)$$

где σ_0 — предел текучести; K — коэффициент упрочнения; ε — пластическая деформация; n — показатель деформационного упрочнения.

Углы формования на последовательных стадиях составляют 0°–20°–20°, 0°–38°–38°, 0°–64°–64° и 0°–90°–90° соответственно. Все стадии процесса активируются последовательно по мере продвижения заготовки.

В качестве исходной была выбрана плоская заготовка толщиной 3 мм, шириной 124 мм и длиной 1580 мм, на переднем крае которой была выполнена фаска для стабилизации ее входа в формующие ролики. В процессе холодной профильной прокатки на четырехвалковом профилегибочном станке на первых этапах формообразования наблюдается локальное утолщение стенки профиля, обусловленное перераспределением материала. Изгиб листа в зонах контакта с роликами приводит к перемещению части материала в направлении стенки профиля и формированию локальных областей напряженного сжатия, что является характерной особенностью поэтапного профилирования (рис. 3).

Результаты численного моделирования геометрических параметров профиля после каждого технологического перехода имеют следующий вид:

после первого перехода толщина стенки составляет 5,2 мм, ширина полок — 50 мм, высота профиля — 20 мм;

после второго перехода толщина стенки уменьшается до 5,0 мм при сохранении ширины полок 50 мм и увеличении высоты профиля до 38 мм;

после третьего перехода толщина стенки составляет 4,9 мм, ширина полок — 50 мм, высота профиля — 64 мм;

после четвертого перехода формируется готовый профиль с толщиной стенки 4,8 мм, шириной полок 50 мм и высотой швеллера 60 мм, что соответствует заданной геометрии.

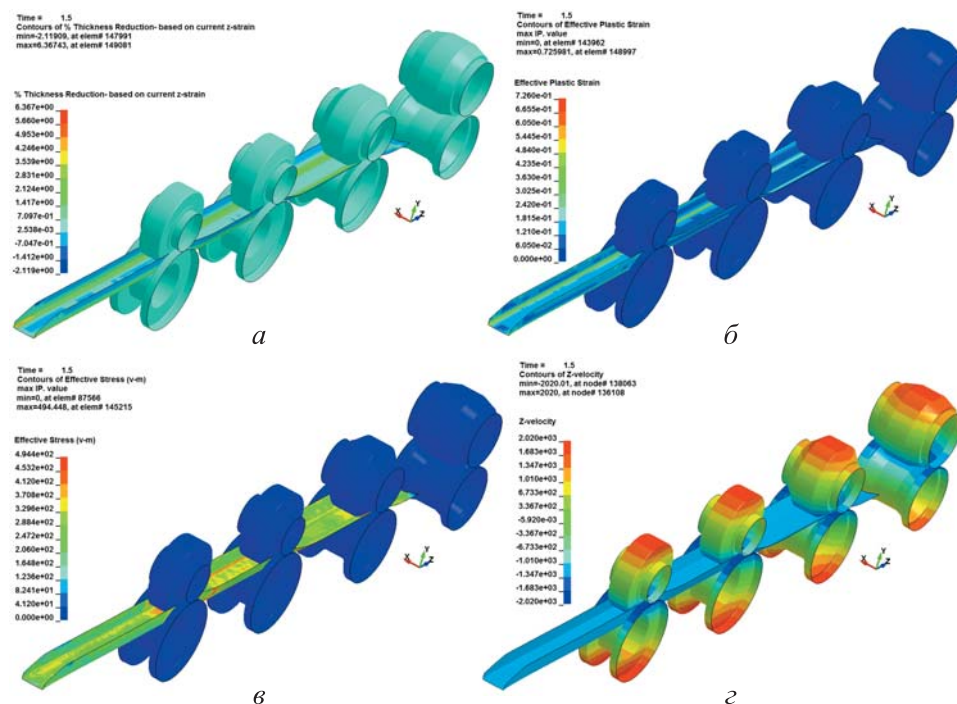


Рис. 3. Результаты численного моделирования в LS-DYNA процесса формообразования швеллерного профиля на четырехвалковом профилегибочном станке:

а — распределение относительного уменьшения толщины листовой заготовки (% Thickness Reduction) после завершения формовки; *б* — распределение эффективной пластической деформации (Effective Plastic Strain), характеризующее локализацию пластического течения в зонах изгиба; *в* — распределение эквивалентных напряжений по фон Мизесу (Effective Stress, von Mises), отражающее напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе формовки; *г* — распределение продольной компоненты скорости деформирования (Z-velocity), показывающее согласованную кинематику заготовки при взаимодействии с формирующими роликами

Контуры относительного уменьшения толщины (% Thickness Reduction) обеспечивают количественную характеристику формоизменения листовой заготовки. Максимальные значения утонения достигают 6...6,4 % и локализуются преимущественно в зонах сопряжения стенки и полок профиля. Такой характер распределения свидетельствует об отсутствии разрушений и аварийных состояний материала и подтверждает корректность выбранных режимов формообразования (рис. 3, *а*).

Карты эффективной пластической деформации (Effective Plastic Strain) показывают максимальные значения порядка $\varepsilon_{eff}^{pl} \approx 0,72$, локализованные в рабочих зонах изгиба (рис. 3, *б*). При этом значительная

часть заготовки остается в области существенно меньших деформаций. Такое распределение характерно для корректно организованного поэтапного формообразования, и оно создает основу для прогнозирования потенциальных зон дефектообразования путем сопоставления с диаграммами предельных деформаций (FLD). Максимальные продольные деформации в зонах локальной концентрации составляют 0,12...0,15 мм/мм, при этом области пластического течения охватывают порядка 70...85 % длины заготовки между формующими клетями. Последующее уменьшение толщины стенки на завершающих переходах объясняется перераспределением пластического потока материала по сечению профиля и стабилизацией его геометрии по мере приближения к конечной форме швеллера.

Поля эквивалентных напряжений по фон Мизесу (von Mises) с максимальными значениями $\sigma^{eff} \approx 490...500$ МПа показывают, что процесс формовки протекает в режиме упругопластического течения материала без выхода в аварийные состояния. Концентрация напряжений наблюдается в зонах контакта с формующими роликами и в радиусах изгиба, что полностью соответствует физике процесса профильной прокатки (рис. 3, в).

Распределение продольной компоненты скорости (Z-velocity) подтверждает согласованную кинематику заготовки при прохождении через формующие ролики. Максимальные значения скорости порядка $\pm 2 \cdot 10^3$ (в расчетных единицах LS-DYNA) локализованы в контактных зонах, при этом отсутствуют резкие скачки и хаотические области, что свидетельствует о стабильности процесса формообразования (рис. 3, з).

Таким образом, представленные поля напряженно-деформированного состояния, эффективной пластической деформации и кинематики заготовки позволяют количественно оценить процесс формообразования, подтвердить физическую реализуемость выбранных режимов и обеспечить достижение заданной геометрии швеллерного профиля. Полученные численные результаты помогают прогнозировать форму, толщину стенки, распределение деформаций и напряжений готового профиля без проведения физического эксперимента. Представленные данные формируют методическую основу для прогнозирования дефектов, оптимизации числа технологических переходов и оценки устойчивости процесса профильной прокатки.

Анализ продольных мембранных деформаций при гибке. В фундаментальном исследовании Бхаттачарья и Смита [6] был проведен сравнительный анализ деформационного поведения материала при различных схемах прокатки — с использованием одиночной и многоклетевой конфигураций профилегибочных станций. Авторы экспериментально установили количественную зависимость характера

распределения продольных мембранных деформаций от угловых параметров гибки, варьируя как абсолютные значения углов изгиба, так и величины их межоперационного приращения (рис. 4). Особое внимание уделено анализу краевых эффектов, а также разработке технологических мер по предотвращению продольного коробления, которое является одной из ключевых проблем при холодном профилировании тонколистовых заготовок.

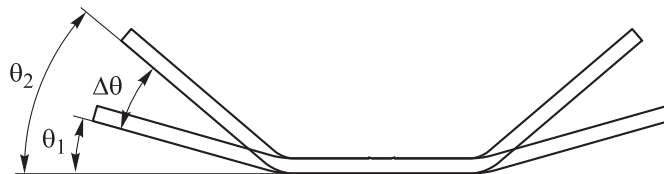


Рис. 4. Схематическое представление параметров угла изгиба θ_1 и его приращения $\Delta\theta$

Результаты работы показали, что многоступенчатое формообразование с оптимально подобранными угловыми приращениями между клетями позволяет снизить уровень продольных деформаций на 25...30 % по сравнению с уровнем при одноступенчатой схеме формования, что подтверждает принципиальную эффективность многопереходных технологий.

Схема определения угла изгиба и его приращения, используемая для анализа межоперационного накопления продольных деформаций, представлена на рис. 4.

Проведенный анализ позволил сформулировать следующие выводы:

1) при использовании одной роликовой клетки ($0 - \theta_1$) наблюдается квазилинейный рост продольной мембранной деформации с увеличением величины угла изгиба θ_1 , что указывает на отсутствие механизмов компенсации деформаций в одноступенчатой схеме;

2) использование многоклетевой схемы формообразования ($0 - \theta_1 - 0$) демонстрирует выраженное преимущество по снижению уровня продольных деформаций по сравнению с одноклетевой конфигурацией. Применение плоских валков на начальной и завершающей стадиях процесса обеспечивает снижение продольных деформаций на 10...15 %, что объясняется перераспределением напряженного состояния и частичной релаксацией деформаций между переходами;

3) в конфигурации с последовательным увеличением угла ($0 - \theta_1 - \theta_2$) уровень деформации остается сопоставимым с тем, который наблюдается на схеме, приведенной в п. 2, при условии сохранения умеренных значений приращения угла между клетями;

4) ключевым параметром, определяющим величину максимальной продольной деформации, является не абсолютное значение угла наклона валков, а величина приращения угла изгиба $\Delta\theta = (\theta_2 - \theta_1)$ между соседними клетями, что имеет принципиальное значение для проектирования технологии профилирования.

Для количественной оценки протяженности зоны пластического деформирования (длины деформации L) при формовке U-образного профиля (рис. 5) из стали 45 и алюминия использовалась следующая аналитическая зависимость [12–15]:

$$L = \sqrt{\frac{8a^3\Delta\theta}{3t}}, \quad (6)$$

где a — характерный размер зоны деформации (длина фланца); $\Delta\theta$ — приращение угла изгиба между клетями; t — толщина материала.

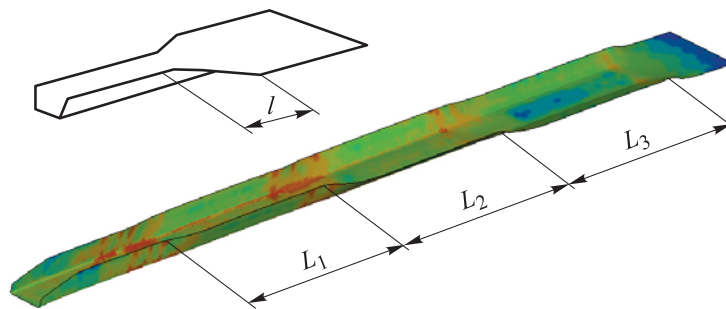


Рис. 5. Распределение продольной деформации вдоль заготовки длиной $L = L_1 + L_2 + L_3$ на трехклетевом профилегибочном станке, L — длина деформации

Как следует из уравнения (6), длина деформации L , являющаяся функцией исключительно геометрических параметров процесса (a , $\Delta\theta$, t), не зависит от механических свойств материала, что подтверждается сопоставимыми результатами для стали и алюминия [16–18]. Данный вывод принципиально важен, поскольку дает возможность использовать геометрические критерии при предварительном проектировании технологии без привлечения детальных моделей материала.

Результаты численного моделирования контактных усилий, действующих на жесткие формующие валки, представлены на рис. 6. Модель с абсолютно жестким инструментом стандартной жесткости демонстрирует периодический характер изменения расчетного усилия, обусловленный дискретной структурой технологических переходов. Пиковое значение силы, достигающее 45 400 Н, наблюдается после четвертой клетки, что связано с наличием фаски на переднем крае заготовки.

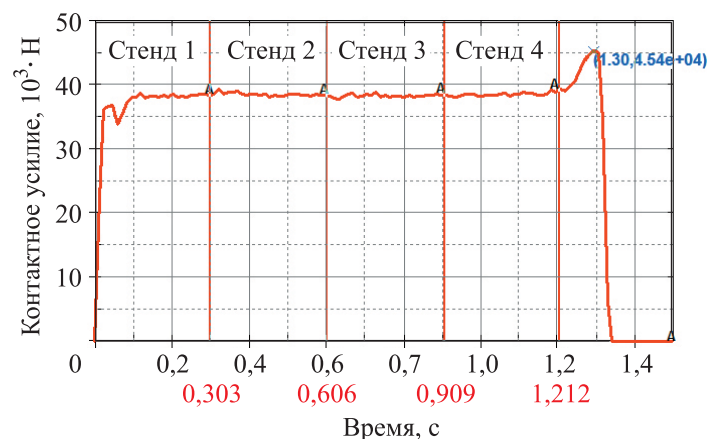


Рис. 6. Распределение контактных усилий по валам в модели с абсолютно жестким инструментом

Данный скачок нагрузки объясняется изменением условий контакта фаски с инструментом, что приводит к локальному увеличению сопротивления деформации. В момент входа скошенной кромки в очаг деформации происходит резкое изменение площади контактного взаимодействия и схемы нагружения, что вызывает кратковременный рост требуемого усилия.

Пространственное распределение эквивалентных напряжений по фон Мизесу, построенное в продольном направлении (ось Z) по результатам конечно-элементного моделирования, представлено на рис. 7.

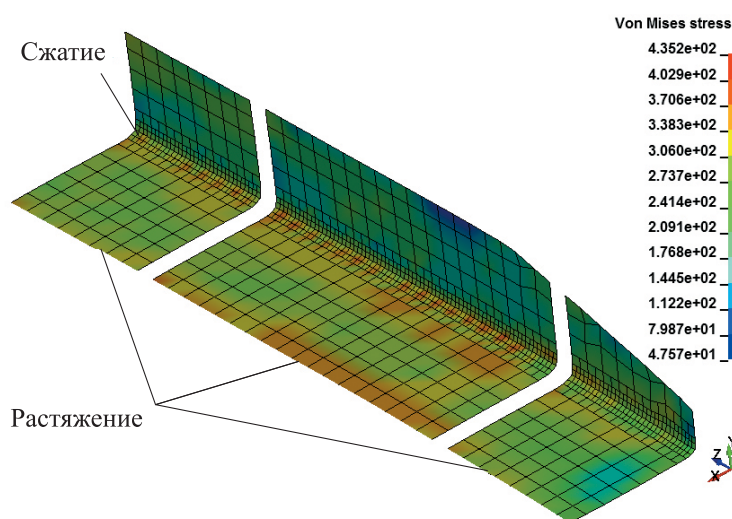


Рис. 7. Конечное распределение эквивалентных напряжений по фон Мизесу [МПа] после выполнения торцевых разрезов

Проведенный анализ позволяет выявить характерные особенности формирования напряженно-деформированного состояния после завершения операции свободной резки. Наиболее существенной закономерностью является выраженная концентрация эквивалентных напряжений в зоне полки профиля, где их значения достигают 350...400 МПа, что на 25...30 % превышает уровень напряжений в стенке профиля (270...300 МПа).

Определяют данную картину распределения напряжений следующие ключевые факторы:

- сложная кинематика деформирования, при которой материал полки проходит более протяженный и многоступенчатый путь пластического течения;

- эффект кумулятивного нагружения, обусловленный циклическим воздействием валков;

- геометрические особенности формообразования, приводящие к локальной концентрации напряжений при изменении сечения.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными исследований [19, 20], где зафиксирован аналогичный характер распределения напряжений при профилировании сложных сечений. Выявленные закономерности подтверждают необходимость учета пиковых напряжений в зоне полки при проектировании технологического процесса, особенно для тонколистовых и высокопрочных материалов. При сохранении деформации в упругой области после разгрузки профиль полностью восстанавливает исходную геометрию. При превышении предела текучести в межоперационных переходах формируются необратимые пластические деформации, приводящие к дефектам типа волнистости и коробления.

Наиболее выраженные пластические деформации были зафиксированы в зонах внутреннего угла, подвергающихся растяжению (B2, C3) и сжатию (A1) (рис. 8). Анализ распределения напряжений показывает, что преобладающая часть внутренней угловой поверхности находится под действием растягивающих напряжений, в то время как зона сжатия локализована в ограниченной области, прилегающей к мелкоразмерной конечно-элементной сетке.

После разгрузки материала от воздействия валков происходит упругое пружинение, приводящее к формированию остаточных напряжений обратного знака, наиболее выраженных в угловых зонах профиля. При этом наблюдаемое распределение напряжений характеризуется существенной пространственной неоднородностью, обусловленной трехмерным характером напряженно-деформированного состояния. Данное явление объясняется совокупным влиянием анизотропии механических свойств материала, неравномерности пластического течения по сечению, переменных условий трения в зоне контакта с валками и геометрии инструмента.

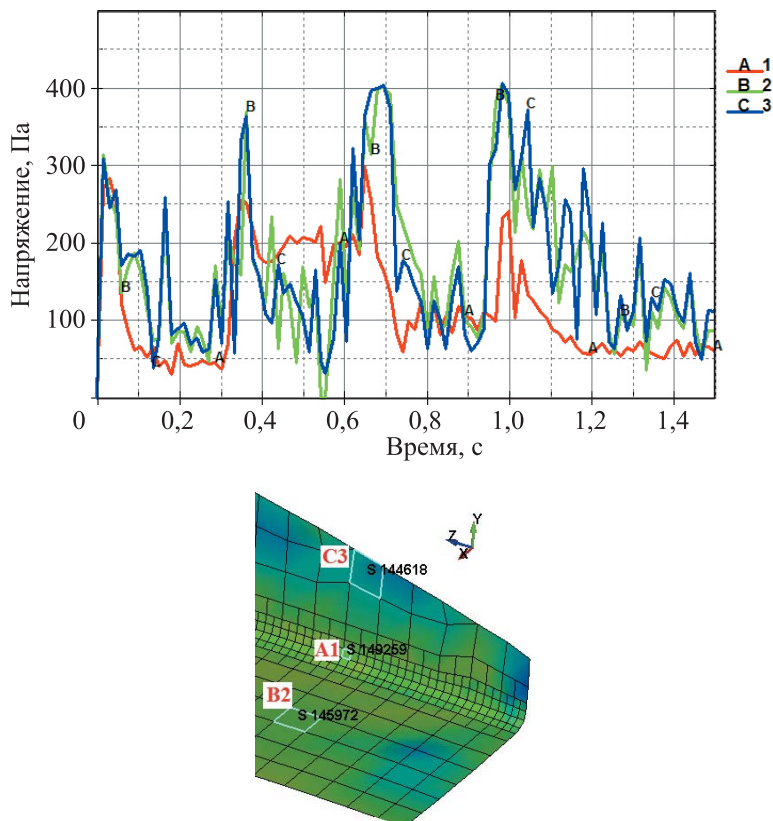


Рис. 8. Эквивалентные напряжения по фон Мизесу, зафиксированные на характерных кривых:

A1 — в зоне угла; B2 — на участке полки; C3 — в торцевой области

Экспериментально и численно подтверждено, что максимальные градиенты напряжений возникают в переходных зонах между плоскими участками и радиусамигиба, где имеет место резкое изменение жесткости сечения. Указанная особенность требует целенаправленного учета при проектировании процессов профилирования современных материалов, склонных к накоплению и релаксации остаточных напряжений.

Построение диаграммы штампуемости (FLD) для анализа предельного состояния материала. Диаграмма предельных деформаций (Forming Limit Diagram, FLD), являющаяся общепринятым и ключевым инструментом количественной оценки формовочной способности листовых материалов, широко применяется для анализа риска возникновения дефектов при процессах формования. Практическая значимость FLD заключается в возможности прогнозирования перехода материала в предельное состояние, поскольку штампуемость лимитируется такими механизмами, как локализация пластической деформации, шейкообразование, возникновение трещин

и повреждение микроструктуры в ходе интенсивного пластического течения.

Границы зон на FLD-диаграмме устанавливаются с введением технологических запасов прочности, обеспечивающих устойчивость процесса к вариациям свойств материала и условий нагружения. В настоящей работе принят запас в 20 % как по допустимому уровню утонения материала, так и по отношению к критической кривой предельных деформаций (FLC — Forming Limit Curve). Выбор данного значения, которое обусловлено рекомендациями [14, 20], обеспечивает консервативную, но физически обоснованную оценку предельного состояния.

Такой подход позволяет выделить на диаграмме (рис. 9) четко разграниченные области, соответствующие разным режимам деформирования:

безопасная зона, в которой деформация протекает без риска разрушения материала;

переходная (зона риска), характеризующаяся повышенной вероятностью возникновения дефектов;

зона разрушения, соответствующая достижению предельных деформаций и нарушению сплошности материала с образованием трещин.

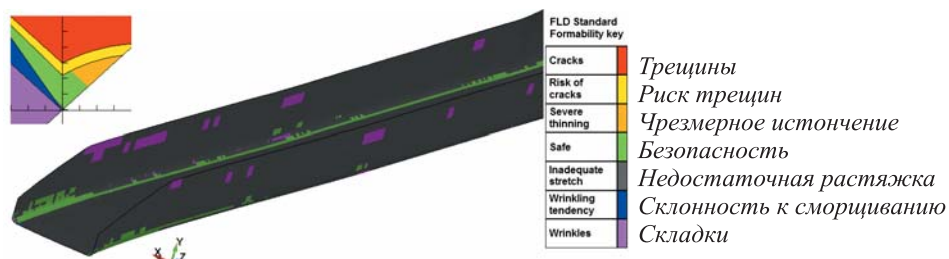


Рис. 9. Распределение расчетных деформаций на FLD-диаграмме с цветовой индикацией уровня риска, полученное в результате численного моделирования

Сравнительный анализ данных, полученных в рамках численного моделирования, подтверждает адекватность примененной математической модели и корректность построения диаграммы предельных деформаций (FLD). Установлено, что распределение расчетных точек на FLD-диаграмме обладает высокой согласованностью и воспроизводимостью, а полученные значения находятся в устойчивых областях деформирования, что свидетельствует о высокой прогностической способности разработанной численной методики (см. рис. 9).

Подавляющее большинство расчетных точек на диаграмме предельных деформаций располагается в области безопасного формования, что указывает на отсутствие условий для локализации пластической

деформации и разрушения материала в рамках выбранных технологических режимов. Отдельные отклонения расчетных точек от усредненных траекторий деформирования обусловлены нелинейным характером пластического течения и локальной чувствительностью модели к граничным условиям контакта, а также пространственной неоднородностью напряженно-деформированного состояния. Таким образом, верифицированная в рамках численного анализа модель может быть использована для прогнозирования дефектов, оценки запаса формовочной способности и оптимизации технологических параметров процесса профилирования без проведения натурных экспериментов.

Представленная диаграмма штампуемости (рис. 10) наглядно визуализирует критические и безопасные режимы деформирования материала при профилировании. Ключевым элементом является кривая предельных деформаций (FLC), выделенная жирной красной линией, которая была получена в результате численного моделирования в программном комплексе LS-PrePost. Данная кривая, соответствующая начальному этапу локализации пластической деформации (стадии шейкообразования), используется в качестве критерия разрушения.

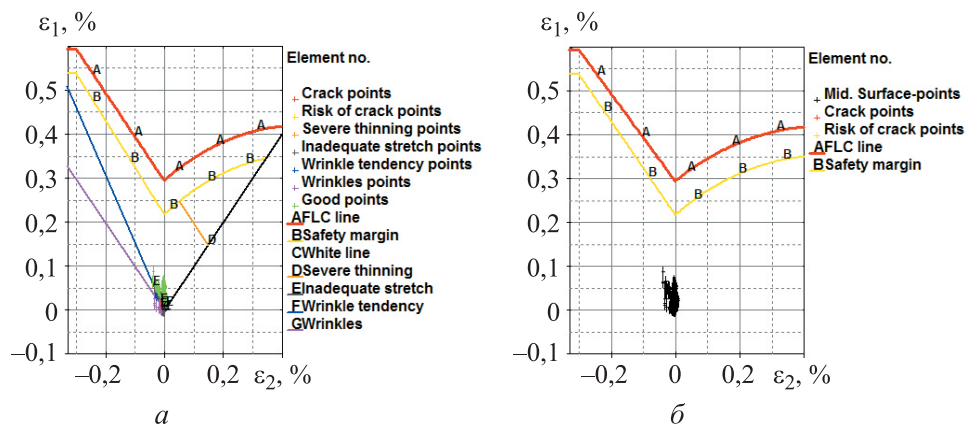


Рис. 10. Диаграммы для анализа штампуемости при профилировании:

a — распределение деформаций в детали; *б* — диаграмма предельных деформаций (FLD) с критической кривой [13]

Для обеспечения технологического запаса ниже кривой FLC с отступом 25 % построена граница безопасной зоны, обозначенная желтой линией. Область, расположенная ниже данной границы и выделенная зеленым цветом, соответствует режиму безрискового деформирования. Цветовая схема диаграммы позволяет оперативно идентифицировать потенциальные дефекты: оранжевая маркировка указывает на риск чрезмерного утонения материала; фиолетовая — сигнализирует о возможности складкообразования вследствие локального сжатия.

Для количественной оценки положения расчетной точки на FLD-диаграмме используется параметр ε_z , определяемый как отношение второстепенной деформации ε_2 к основной деформации ε_1 . Данное соотношение в комбинации с деформацией по толщине ε_3 позволяет однозначно классифицировать режим деформирования материала в соответствии с уравнениями [20]:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = -\varepsilon_3/(1 + \varepsilon_z), \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_z \varepsilon_1, \end{cases} \quad (7)$$

где ε_3 — деформация, характеризующая изменение толщины материала.

Используемый математический аппарат обеспечивает корректную интерпретацию результатов численного моделирования и их прямое сопоставление с экспериментальными данными, что принципиально важно для верификации модели.

Проведенный анализ диаграммы формовочной способности (рис. 10, *а*) показывает, что область безопасного деформирования, обозначенная зеленым цветом и расположенная ниже границы запаса прочности, характеризуется отсутствием дефектов и нарушений сплошности материала. Фактическое совпадение данной зоны с контуром исходной заготовки свидетельствует о сохранении целостности материала как в зонах изгиба (по главной деформации ε_1), так и в областях растяжения (по второстепенной деформации ε_2).

Отсутствие красной зоны, соответствующей разрушению материала, объясняется контролируемым характером утонения в процессе профилирования, что подтверждает оптимальность выбранных технологических режимов. Полученные данные указывают на удовлетворительную штампуемость материала, что хорошо коррелирует с промышленными наблюдениями и результатами натурных испытаний.

На диаграмме предельных деформаций FLD (рис. 10, *б*) все расчетные точки располагаются ниже кривой запаса прочности (желтая линия), что свидетельствует о умеренном уровне деформационных воздействий. При этом величина главной инженерной деформации ε_1 не превышает 1 %, что соответствует стабильному режиму формообразования. Смещение расчетных точек выше критических кривых А или В неизбежно привело бы к локализации деформации и разрушению материала, что в настоящей работе не наблюдалось.

Важным результатом исследований является установление удовлетворительной корреляции между данными численного моделирования и экспериментальными результатами при оценке формовочной способности [20–23], что окончательно верифицирует адекватность примененной математической модели и корректность выбранных критериев предельного состояния.

Заключение. Проведенное комплексное численное исследование позволило сформулировать следующее.

Разработана ресурсосберегающая численная технология профилирования. Кроме того, разработана и реализована численная технологическая схема формообразования швеллерных и U-образных профилей на базе программного комплекса LS-DYNA, обеспечивающая повышение коэффициента использования материала и общей производственной эффективности за счет оптимизации геометрии валков и последовательности технологических переходов. Численные результаты подтверждают достижение заданных геометрических параметров профиля и допустимых уровней напряженно-деформированного состояния материала, что соответствует требованиям, предъявляемым к холодно профилированным изделиям.

Подтверждена адекватность расчетных методик. Проведенный анализ результатов трехмерного конечно-элементного моделирования демонстрирует внутреннюю согласованность расчетных полей напряжений, деформаций, скоростей и утонения материала, а также их физическую интерпретируемость в рамках теории упругопластического деформирования. Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанной численной модели для анализа сложных процессов валкового формообразования, включая зональное деформирование, накопление пластических деформаций и эволюцию напряженно-деформированного состояния без привлечения натурных экспериментов.

Сформирован численный оптимизационный комплекс. Создана автоматизированная система поддержки принятия технологических решений, основанная на параметрических численных экспериментах и методах оптимизации. Программный комплекс включает базу данных расчетных режимов формообразования и алгоритмы поиска рациональных параметров настройки прокатного оборудования, обеспечивающие минимизацию концентраций деформаций и снижение риска дефектообразования. На основе обобщения результатов численного моделирования сформирована репрезентативная расчетная база данных, применимая для проектирования рациональной геометрии и пространственной конфигурации валков, которая позволяет существенно сократить сроки разработки технологических режимов.

Усовершенствована численная модель инструмента, в частности, разработана усовершенствованная конечно-элементная модель валкового узла, учитывающая различное число степеней свободы верхнего и нижнего инструмента, включая угловое смещение относительно направления прокатки (ось Z). Для повышения точности расчета жесткостные характеристики валков заданы с использованием балочных элементов, что позволило более корректно учитывать

их деформационное взаимодействие с заготовкой в процессе нагружения.

Установлены численные корреляционные зависимости. В результате регрессионного анализа данных численного моделирования выявлена устойчивая взаимосвязь между технологическими параметрами (высота полки, толщина заготовки, скорость деформирования) и склонностью материала к продольному короблению кромок. Для количественной оценки степени дефектообразования введен критерий стандартного отклонения продольной деформации ($\Delta \epsilon$), продемонстрировавший высокую чувствительность к изменению режимов обработки. Анализ расчетных полей деформаций показал, что растягивающие напряжения концентрируются преимущественно в зоне полки и торца профиля, тогда как сжимающие напряжения локализуются в угловых участках, что соответствует физике процесса профильной прокатки.

Оптимизирована схема расположения валков. На основе анализа геометрии U-образного профиля разработана оптимальная численная схема расположения рабочих валков «цветочный узор» для четырехвалкового прокатного стана. Оптимизация параметров конфигурации валков выполнена с учетом особенностей поперечного сечения профиля и характера накопления пластических деформаций, что позволило сформировать эффективную технологическую схему формообразования. Результаты численного моделирования подтвердили возможность точного прогнозирования геометрии готового профиля, что свидетельствует об адекватности применяемой математической модели и корректности методики расчета.

Проведен анализ влияния упрочнения и контактных условий. Установлено, что параметры деформационного упрочнения материала и условия контактного трения оказывают существенное влияние на распределение пластических деформаций и остаточных напряжений по поперечному сечению профиля. Полученные результаты создают основу для дальнейшей численной оптимизации технологических режимов с целью снижения остаточных напряжений и повышения точности профилей, особенно при формообразовании современных высокопрочных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. *Остаточные напряжения: теория и приложения*. Москва, Наука, 1982, 384 с.
- [2] Коликов А.П., Лютцау А.В., Лисунец Н.Л., Гладков В.И., Шпунькин Н.Ф. Влияние остаточных напряжений на качество изделий при холодной обработке давлением листовых заготовок. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2011, № 2 (12), с. 139–144.

- [3] Макеев С.А., Горьковенко В.А., Сеитов Е.А., Рахуба Л.Ф. Определение остаточных напряжений в сжатых полках арочных стальных тонколистовых холоднокатаных профилированных листов. *Вестник СибаДИ*, 2019, т. 16, № 6 (70), с. 758–765. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765>
- [4] Kiuchi M. Roll-Forming in Japan. *The 25th Anniversary Issue of J. of Japan Society for Technology of Plasticity (JSTP)*, 1986, pp. 674–680.
- [5] Zhu S.D., Panton S.M. and Duncan J.L. The effects of geometric variables in roll forming a channel section. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1996, vol. 210, pp. 127–134.
- [6] Bhattacharya D., Smith P.D. The Development of Longitudinal Strain in Cold Roll Forming and its Influence on Product Straightness. *Adv. Technol. Plast.*, 1984, vol. 1, pp. 422–427.
- [7] Lindgren M. Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel. *J. Mater. Process Technol.*, 2007, vol. 186 (1–3), pp. 77–81.
- [8] Ingvarsson L. Förenklad teori för rullformning av elementär V-profil, jämförelse mellan normalt och höghållfast stål. *VAMP 15-rullformning 23rd April 2001*.
- [9] Park J.C., Yang D.Y., Cha M.H., Kim D.G. and Namb J.B. Investigation of a new incremental counter forming in flexible roll forming to manufacture accurate profiles with variable cross-sections. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2014, vol. 86, pp. 68–80.
- [10] Woo Y.Y., Han S.W., Hwang T.W., Park J.Y. and Moon Y. H. Characterization of the longitudinal bow during flexible roll forming of steel sheets. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 252, pp. 782–794.
- [11] Ma Z., Luo Y., Wang. Y. and Mao J. Geometric design of the rolling tool for gear roll-forming process with axialinfeed. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 258, pp. 67–79.
- [12] Mohanraj Murugesana et al. Experimental and numerical investigation of cold roll forming process. *J. Phys.: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 758, Art. 012067.
- [13] Астапов Ю.В., Христич Д.В. Численное моделирование экспериментов по определению типа начальной анизотропии упругих материалов. *Вычислительная механика сплошных сред*, 2015, т. 8, № 4, с. 386–396. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2015.8.4.33>
- [14] Zhang W., Li Y., Wang H. Optimization of roll-forming process parameters for high-strength steel using neural network and genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 75, pp. 1006–1015.
- [15] Марутян А.С. Сравнительный расчет оптимальных параметров швеллерных гнутых и гнутозамкнутых профилей. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*, 2019, № 15 (6), с. 415–432. EDN QZZIYQ
- [16] Lee S., Kim H., Park C. A study on the edge wave defect in roll forming of advanced high-strength steel. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, vol. 22 (3), pp. 487–499.
- [17] Катрюк В.П., Сидельников С.Б., Дитковская Ю.Д., Якивбюк О.В., Галиев Р.И. *Технология прокатки*. Красноярск, СФУ, 2020 (2020-05-15), 32 с.
- [18] Hong S., Lee S., Min S. Deep learning-based prediction of springback in roll forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, vol. 312, Art. 117842.
- [19] Kurlaev N.V. and Ahmed Soliman M.E. Influence of the electromagnetic field pressure on the free bending of the straight side. *J. Phys.: Conference Series*, 2021, vol. 2094, Art. 042047 (7 p.).
- [20] Ахмед Солиман М.Э. Исследование деформирования листовых алюминиевых сплавов при формообразовании деталей летательных аппаратов дав-

лением импульсного магнитного поля: Дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. Новосибирск, 2022, 239 с.

- [21] Suzuki T., Yamamoto H. Effect of roll design on product quality in cold roll forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 275, Art. 116366.
- [22] Anderson B., Clark D. Machine learning applications in roll forming process control. *Artificial Intelligence in Manufacturing*, 2022, vol. 4 (2), pp. 89–104.
- [23] Wagner P., Schultz R. Hybrid modeling approach for roll forming process optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, vol. 104, Art. 104377.

Статья поступила в редакцию 29.09.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ахмед Солиман М.Э., Чинахов Д.А., Курлаев Н.В. Численное моделирование процесса формообразования профиля на четырехвалковом листогибочном станке. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 4. EDN SVRWXV

Ахмед Солиман Мохамед Шериф Эль Сайед — канд. техн. наук, доцент кафедры самолето- и вертолетостроения, НГТУ; у автора более 40 научных работ в области магнитно-импульсной штамповки и сварки. e-mail: axmed_soliman@corp.nstu.ru

Чинахов Дмитрий Анатольевич — д-р техн. наук, доцент, декан факультета летательных аппаратов, НГТУ; у автора более 100 научных работ в области сварки и фрезерования при электронно-лучевой 3D-печати. e-mail: chinakhov@corp.nstu.ru

Курлаев Николай Васильевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой самолето- и вертолетостроения, НГТУ; у автора более 110 научных работ в области магнитно-импульсной штамповки и сварки. e-mail: kurlaev@corp.nstu.ru

Numerical Simulation of Profile Forming Process on a Four-Roll Plate Bending Machine

© M.E. Akhmed Soliman, D.A. Chinakhov, N.V. Kurlaev

Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, 630073, Russian Federation

The process of forming a channel profile from a steel sheet blank on a four-roll plate bending machine has been investigated. The aim of the study is to develop a high-accuracy numerical model of step-by-step forming of a sheet blank, enabling prediction of the three-dimensional stress-strain state, distribution of equivalent stresses and strains, and variations in the geometric parameters of the profile at all stages of forming, as well as to establish a calculation methodology for evaluating material formability and process stability using the forming limit diagram (FLD). To achieve this aim, numerical simulation based on the finite element method, implemented in the LS-DYNA software package, was applied. A three-dimensional mathematical model of the interaction between the blank and the forming rolls was developed, taking into account contact conditions, elastoplastic material behavior, nonlinear properties of steel, and the sequence of technological stages. The model makes it possible to trace the evolution of profile formation, identify zones of local stress concentration, assess the effect of cumulative plastic deformation, and analyze the influence of forming angles, inter-roll distance, and sheet thickness on the distribution of stresses and strains. Within the scope of the present study, experimental validation is not considered; the main focus is placed on the development and analysis of a numerical methodology for predicting the channel profile forming process. To analyze the risk of defect formation and assess the material limit state, an FLD analysis was performed, enabling the identification of safe deformation zones and regions of potential failure without the need for physical experiments. As a result of numerical simulation, detailed fields of equivalent stresses, longitudinal and transverse strains were obtained; changes in the geometric parameters of the profile at each forming stage were calculated, and a comparison of the computed strains with the forming limit curve on the FLD diagram was performed. Analysis of the influence of key process parameters on strain uniformity and the minimization of stress concentrations makes it possible to optimize the sequence of forming passes and the parameters of the roll tooling. The developed numerical model not only enables prediction of the geometry of the finished profile, but also serves as a computational and methodological basis for planning cold roll forming processes.

Keywords: cold roll forming, longitudinal and axial strains of sheet material, finite element method (FEM) simulation, forming limit diagram (FLD), von Mises equivalent stress, optimization of forming process parameters

REFERENCES

- [1] Pozdeev A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Ostatochnye napryazheniya: teoriya i prilozheniya* [Residual stresses: theory and applications]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 384 p.
- [2] Kolikov A.P., Lyuttsau A.V., Lisunets N.L., Gladkov V.I., Shpunkin N.F. *Vliyanie ostatochnykh napryazheniy na kachestvo izdeliy pri kholodnoy obrabotke davleniem listovykh zagotovok* [Residual stresses influence on the products quality during cold pressure processing of sheet blanks]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2011, no. 2 (12), pp. 139–144.

- [3] Makeev S.A., Gorkovenko V.A., Seitov E.A., Rahuba L.F. Compressed flanges of arched steel thin-walled cold-rolled profiled sheets: determination of residual stresses. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, vol. 16, no. 6 (70), pp. 758–765. (In Russ).
<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-758-765>
- [4] Kiuchi M. Roll-Forming in Japan. *The 25th Anniversary Issue of J. of Japan Society for Technology of Plasticity (JSTP)*, 1986, pp. 674–680.
- [5] Zhu S.D., Panton S.M. and Duncan J.L. The effects of geometric variables in roll forming a channel section. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1996, vol. 210, pp. 127–134.
- [6] Bhattacharya D., Smith P.D. The Development of Longitudinal Strain in Cold Roll Forming and its Influence on Product Straightness. *Adv. Technol. Plast.*, 1984, vol. 1, pp. 422–427.
- [7] Lindgren M. Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel. *J. Mater. Process Technol.*, 2007, vol. 186 (1-3), pp. 77–81.
- [8] Ingvarsson L. Förenklad teori för rullformning av elementär V-profil, jämförelse mellan normalt och höghållfast stål. *VAMP 15-rullformning 23rd April 2001*.
- [9] Park J.C., Yang D.Y., Cha M.H., Kim D.G., Namb J.B. Investigation of a new incremental counter forming in flexible roll forming to manufacture accurate profiles with variable cross-sections. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2014, vol. 86, pp. 68–80.
- [10] Woo Y.Y., Han S.W., Hwang T.W., Park J.Y. and Moon Y. H. Characterization of the longitudinal bow during flexible roll forming of steel sheets. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 252, pp. 782–794.
- [11] Ma Z., Luo Y., Wang. Y. and Mao J. Geometric design of the rolling tool for gear roll-forming process with axialinfeed. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 258, pp. 67–79.
- [12] Mohanraj Murugesana et al. Experimental and numerical investigation of cold roll forming process. *J. Phys.: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 758, Art. 012067.
- [13] Astapov Yu.V., Khristich D.V. Chislennoe modelirovanie eksperimentov po opredeleniyu tipa nachal'noy anizotropii uprugikh materialov [Numerical modeling of experiments by detecting of initial anisotropy type of elastic materials]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred — Computational Continuum Mechanics*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 386–396.
<https://doi.org/10.7242/1999-6691/2015.8.4.33>
- [14] Zhang W., Li Y., Wang H. Optimization of roll-forming process parameters for high-strength steel using neural network and genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 75, pp. 1006–1015.
- [15] Marutyan A.S. Sravnitel'nyy raschet optimalnykh parametrov shvellernykh gnutyykh i gnutozamknutykh profiley [Comparative calculation of optimal parameters of channel bent and bent closed profiles]. *Stroitel'naya mekhanika in-zhenernykh konstruksiy i sooruzheniy — Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2019, no. 15 (6), pp. 415–432. EDN QZZIYQ
- [16] Lee S., Kim H., Park C. A study on the edge wave defect in roll forming of advanced high-strength steel. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, vol. 22 (3), pp. 487–499.
- [17] Katryuk V.P., Sidelnikov S.B., Ditkovskaya Yu.D., Yakiviyuk O.V., Galiev R.I. *Tekhnologiya prokatki*. Krasnoyarsk, SFU, 2020 (2020-05-15), 32 p.
- [18] Hong S., Lee S., Min S. Deep learning-based prediction of springback in roll forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, vol. 312, Art. 117842.

- [19] Kurlaev N.V., Ahmed Soliman M.E. Influence of the electromagnetic field pressure on the free bending of the straight side. *J. Phys.: Conference Series*, 2021, vol. 2094, Art. 042047 (7 p.).
- [20] Ahmed Soliman M.E. *Issledovanie deformirovaniya listovykh alyuminiyevykh splavov pri formoobrazovanii detaley letatelnykh apparatov davleniem impulsnogo magnitnogo polya: diss. ... kand. tekhn. nauk: 01.02.06* [Study of deformation of sheet aluminum alloys during forming of aircraft parts by pulsed magnetic field pressure: PhD dissertation]. Novosibirsk, 2022, 239 p.
- [21] Suzuki T., Yamamoto H. Effect of roll design on product quality in cold roll forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 275, Art. 116366.
- [22] Anderson B., Clark D. Machine learning applications in roll forming process control. *Artificial Intelligence in Manufacturing*, 2022, vol. 4 (2), pp. 89–104.
- [23] Wagner P., Schultz R. Hybrid modeling approach for roll forming process optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, vol. 104, Art. 104377.

Akhmed Soliman Mohamed Sherif El Sayed, Cand. Sc. in Engineering (PhD), Assoc. Professor, Department of Aircraft and Helicopter Engineering, NSTU; he has more than 40 scientific publications in the field of magnetic pulse forming and welding. e-mail: axmed_soliman@corp.nstu.ru

Chinakhov D.A., Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, Dean of the Faculty of Aircraft, NSTU; the author has more than 100 scientific publications in the field of welding and milling in electron beam 3D printing. e-mail: chinakhov@corp.nstu.ru

Kurlaev N.V., Dr. Sc. in Engineering, Professor, Head of the Department of Aircraft and Helicopter Engineering, NSTU; the author has more than 110 scientific publications in the field of magnetic pulse forming and welding. e-mail: kurlaev@corp.nstu.ru