

УДК 621.0.43

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГИБКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШТАМПОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. Н. Клочков¹, М. Э. Подымако², И. А. Колесов³

¹ Начальник бюро надёжности ОЛаб ЛМ ОАО «Могилевлифтмаш», Могилев, Беларусь, e-mail: vnklochkov@mail.ru

² Заведующий ОЛаб ЛМ ОАО «Могилевлифтмаш», Могилев, Беларусь, e-mail: podymako_m@mail.ru

³ Ведущий инженер-технолог ОГТ ОАО «Могилевлифтмаш», Могилев, Беларусь, e-mail: bn_ntc@liftmach.by

Реферат

В статье рассмотрен подход к моделированию холодной штамповки листовых материалов на конкретном примере. Осуществлена пошаговая реализация процесса моделирования, которая позволила определить геометрию заготовки, параметры оборудования, величину хода штампа. На основании феноменологической конститутивной модели Джонсона-Кука проведена оценка неповреждаемости листового материала.

Ключевые слова: штамповое оборудование, модель Джонсона-Кука, крепление направляющих, холодное деформирование.

MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF BENDING SHEET PARTS AT THE STAGE OF DESIGNING STAMPING EQUIPMENT

V. N. Klochkov, M. E. Podymako, I. A. Kolesov

Abstract

The article discusses an approach to modeling cold stamping of sheet materials using a specific example. A step-by-step implementation of the modeling process was carried out, which made it possible to determine the geometry of the workpiece, equipment parameters, and the amount of stamp stroke. Based on the Johnson-Cook phenomenological constitutive model, the damage integrity of sheet material was assessed.

Keywords: stamping equipment, Johnson-Cook model, guide fastening, cold forming.

Введение

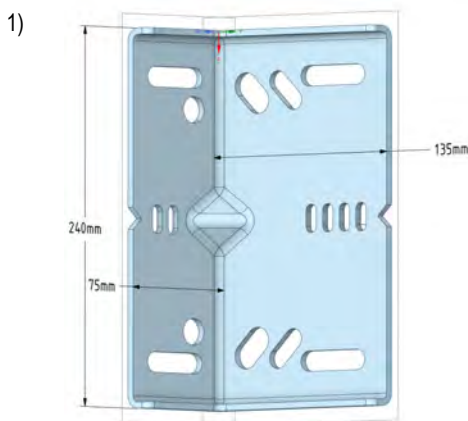
Несмотря на значительные объемы выпускаемых ОАО «Могилевлифтмаш» лифтов, в месяц (до 1400 лифтов), назвать производство серийным в полной мере нельзя. Причиной этому являются так называемые специальные лифты, которые требуют индивидуального подхода на всех этапах производства. Это отличает предприятие от конкурентов – реагирование на их потребности и подстраивание под них.

Однако в большинстве лифтов существуют повторяющиеся элементы, которые в составе одного лифта могут применяться не в единственном экземпляре. К таким элементам можно отнести комплектующие дверей шахты, которые устанавливаются на каждом этаже и их число соответствует этажности здания, а также элементы крепления направляющих в шахте, которые устанавливаются с определенным шагом с учетом грузоподъемности и форм-фактора лифта, а также сейсмичности района установки.

Повторяющиеся элементы ввиду большой серийности целесообразно изготавливать высокопроизводительными способами, такими на ОАО «Могилевлифтмаш» являются литье и штамповка. Выбор технологии изготовления [1] должен выполняться для каждого изделия индивидуально с учетом стоимостных аспектов, технологических и организационных ограничений.

Моделирование технологического процесса гибки

Объектом рассмотрения в статье является кронштейн установки направляющих 1010.05.00.002, имеющий треугольную выштамповку в средней части, которую в течение месяца на 1000 лифтов могут изготавливать 10000 штук (рисунок 1). Кронштейн служит для установки жестких направляющих, служащих для позиционирования лифта во время движения в нормальном режиме эксплуатации и остановки и удержания его при режиме аварийной остановки (посадки на ловители). Как следствие, точность геометрии штампованного кронштейна существенно влияет на характеристики движения лифта в процессе эксплуатации. Одним из лимитирующих параметров качества работы лифтового оборудования является вертикальная вибрация в кабине, величина которой в том числе зависит от прямолинейности установки ниток направляющих, закрепленных к строительной части лифтовой шахты с использованием данного кронштейна. Форма и перфорация кронштейна обусловлена его позиционированием и креплением к шахте лифта, к направляющей и вспомогательным кронштейнам, служащим для обеспечения необходимых параметров вылета направляющих по отношению к строительной части шахты установки лифтового оборудования.

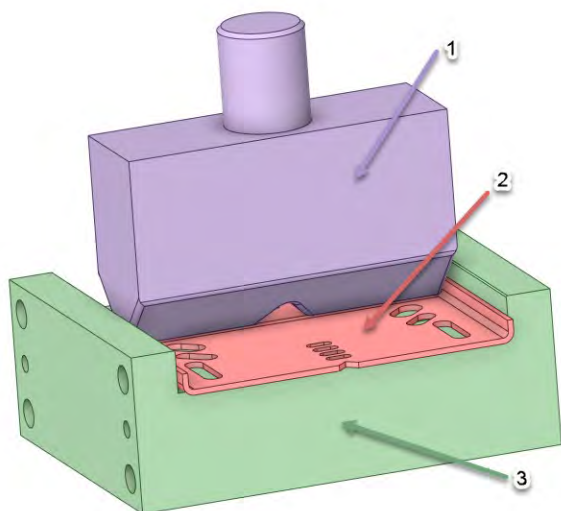


1 – 3D-модель проектируемого кронштейна; 2 – фото реального объекта
Рисунок 1 – Кронштейн 1010.05.00.002

После проведения стоимостной оценки, а также анализа логики, было принято решение о разработке штамповой оснастки. Штамповая оснастка – комплект изделий, ошибка при проектировании которых стоит очень дорого как в стоимостной, так и во временной составляющих. Для оптимального выбора геометрии и материалов штамповой оснастки требуется четкое определение силовых процессов, происходящих в процессе формообразования изделия с учетом трения взаимодействующих поверхностей и упругой деформативной составляющей. Ввиду этого было реализовано проведение численного моделирования процесса штамповки как для определения необходимых усилий прессового оборудования, так и проверки корректности оснастки, спроектированной технологической службой.

Последовательность подготовки математической модели процесса штамповки, как при моделировании любого процесса деформирования с использованием сеточных методов [2], включает в себя следующие этапы:

1. Подготовку геометрии, в нашем случае это исходная заготовка, а также матрица и пуансон (рисунок 2).



1 – пуансон; 2 – заготовка (карточка); 3 – матрица
Рисунок 2 – Геометрия заготовки и штамповой оснастки

Как следует из приведенного рисунка 2, заготовка представляет собой предварительно подготовленный объект с отгибами по краям полученных на предварительной операции холодного формообразования – гибкой. Получение готового изделия с одной установки на штамповом оборудовании сопряжено с непропорциональными затратами вследствие повышенной сложности.

2. Формирование конечно-элементной модели.

Конечно-элементная модель заготовки формировалась объемными гексаэдрическими элементами со сгущениями сетки в местах больших деформаций (рисунок 3), при этом матрица и пуансон рассматривались как абсолютно жесткие тела. Количество элементов составляет – 16110.

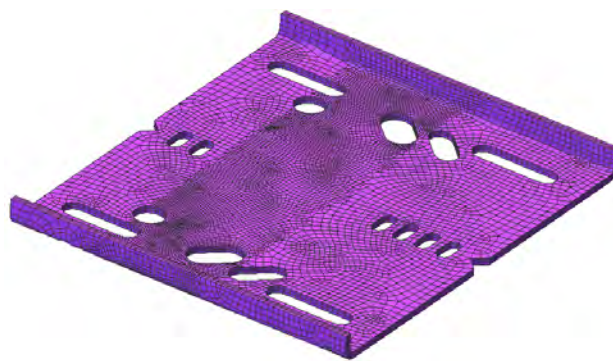


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель заготовки

3. Задание свойств материалов и контактных взаимодействий.

Свойства материала заготовки (Ст 3 ГОСТ 14637-89) описывались диаграммой деформирования в истинных координатах, которая была получена после обработки и пересчета диаграмм по результатам испытаний образцов по ГОСТ 1497-84 на базе Центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения НАН Б». Инженерная и истинная диаграммы деформирования для материала заготовки (Ст 3) приведены на рисунке 4.

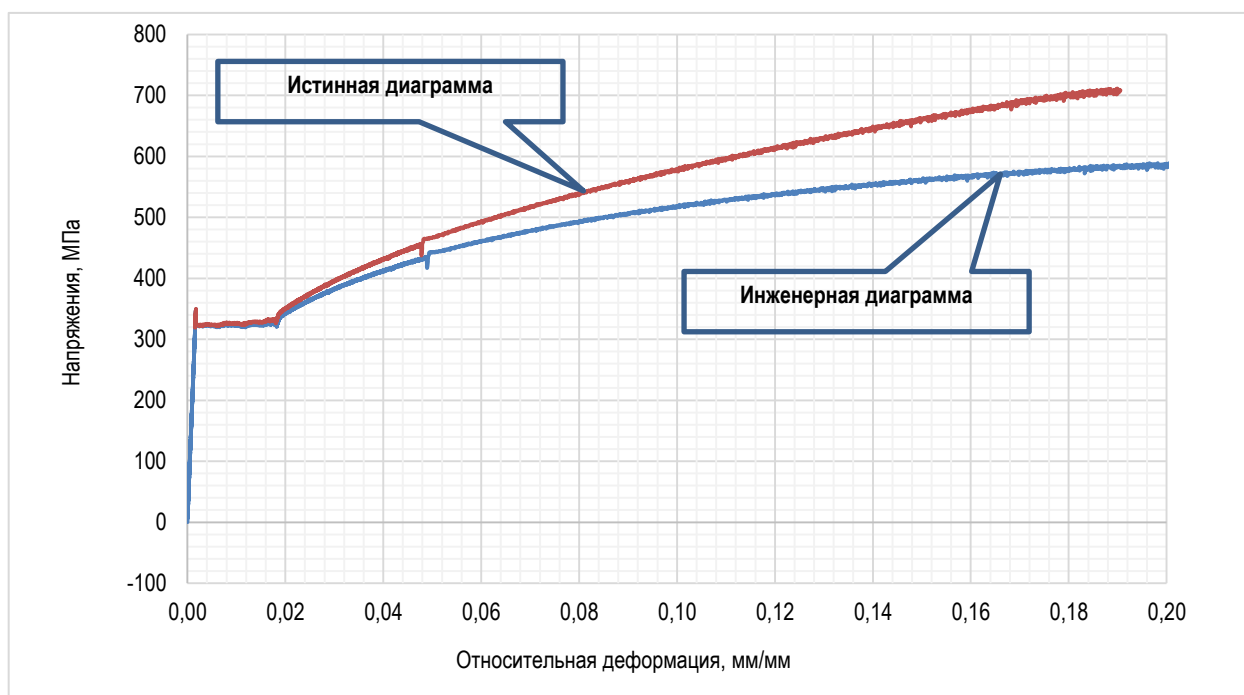


Рисунок 4 – Инженерная и истинная диаграммы напряжение-деформация стали Ст 3.

Контактные взаимодействия задавались между всеми телами в математической модели и представляли собой односторонние контакты с коэффициентом трения, равным 0,12.

4. Задание граничных условий и ходов инструмента.

Граничными условиями являлись фиксация матрицы и задание прямого и обратного хода пуансону с высвобождением детали, что позволяет учесть эффект обратного пружинения изделия. Следует отметить, что граничные условия, накладываемые в модели, соответствуют реальному закреплению и нагружению в условиях производства.

5. Оценки неповреждаемости листового материала.

С целью оценки неповреждаемости листового материала в процессе штамповки проведен расчет предельной пластической деформации с использованием феноменологической конститутивной модели Джонсона-Кука. Данная модель одна из самых распространенных при описании металлов при быстропротекающих процессах деформирования, к которым относится гибка листового материала в процессе штамповки. В данной модели учтены отдельные эффекты деформационного упрочнения, скорости деформации (вязкости), термического размягчения, что выражается зависимостью

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \cdot e^{D_3 \cdot \eta}) \cdot (1 + D_4 \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}) \cdot (1 + D_5 \cdot \frac{T - T_0}{T_m - T_0}),$$

где ε_f – величина предельно допустимой деформации, мм/мм;

$D_1 \dots D_5$ – коэффициенты модели Джонсона-Кука для данного материала;

$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eg}}$ – коэффициент, учитывающий тип напряженного состояния;

σ_m – среднее (гидростатическое) напряжение, МПа;

σ_{eg} – эквивалентные напряжения (Von Mises), МПа;

$\dot{\varepsilon}_p$ – скорость пластических деформаций, c^{-1} ;

$\dot{\varepsilon}_0$ – скорость деформации при определении коэффициентов $D_1 \dots D_5$, c^{-1} ;

T – температура заготовки в процессе штамповки, $^{\circ}C$;

T_m – температура плавления, $^{\circ}C$;

T_0 – комнатная температура, $^{\circ}C$.

Коэффициенты модели Джонсона-Кука в полном объеме имеются для ASTM A36 [3] и представлены в таблице 1. Ст3 является аналогом стали ASTM A36, и как следствие, для проведения дальнейших вычислений принимаем аналогичные значения приведенных коэффициентов.

Таблица 1 – Параметры модели Джонсона-Кука

Материал	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$T_m, ^{\circ}C$	$T_0, ^{\circ}C$	$\dot{\varepsilon}_0, c^{-1}$
	0,403	1,107	0,1	0,00961	0	1430	25	1

Для определения величины предельной пластической деформации из реализованной математической модели определяем следующие параметры:

1. Скорость пластических деформаций $\dot{\varepsilon}_p$.

На рисунке 5 представлен график скорости пластической деформации по результатам численного моделирования технологического процесса, полученный путем дифференцирования пластических деформаций по времени.

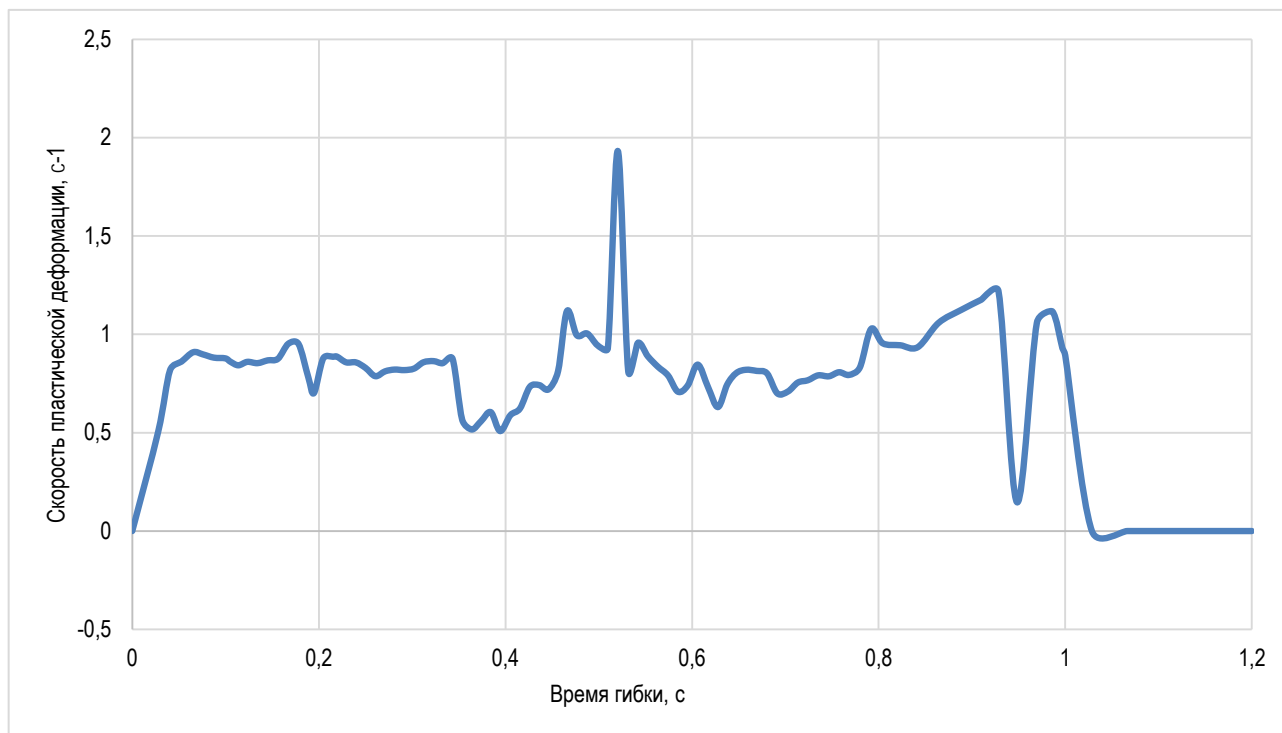


Рисунок 5 – Скорость пластической деформации

Анализ графика, приведенного на рисунке 5, показывает, что основная часть процесса гибки происходит со скоростями пластической деформации 0,5–1,2 c^{-1} .

2. Коэффициент, учитывающий тип напряженного состояния η .

На рисунке 6 приведена картина распределения коэффициента η , учитывающего тип напряженного состояния как отношения величины средних главных напряжений к эквивалентному напряжению.

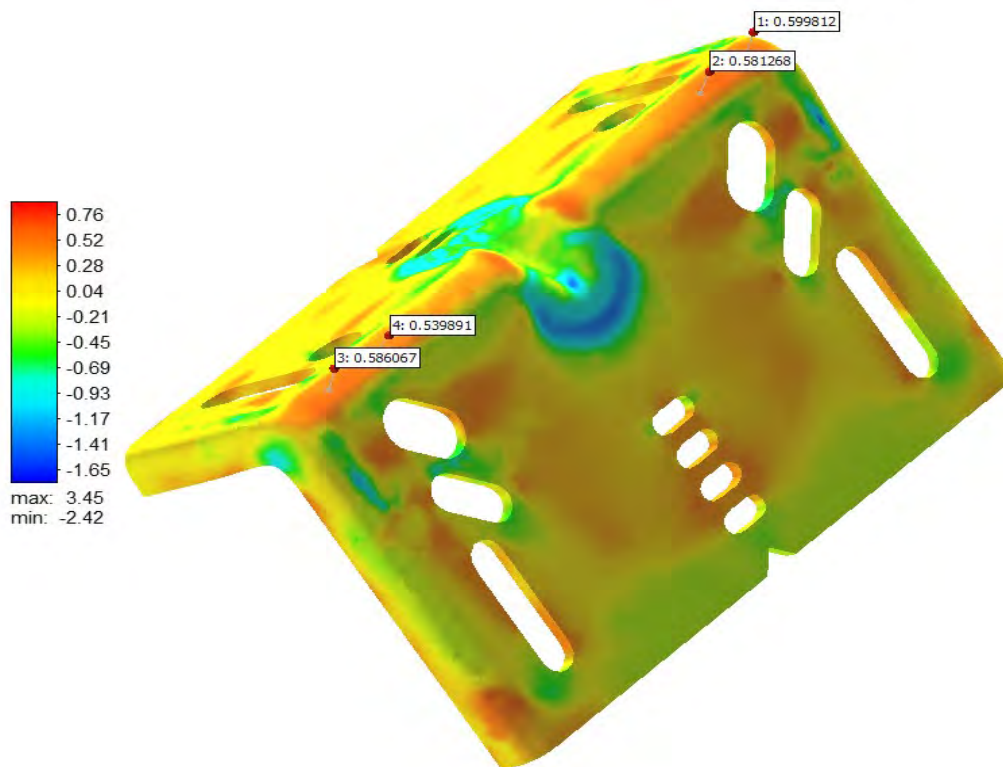


Рисунок 6 – Картина распределения коэффициента жесткости напряженного состояния

Исходя из приведенного рисунка принимаем величину коэффициента жесткости напряженного состояния – $\eta = 0,565$.

На рисунке 7 представлены графики фактических и предельных величин пластического деформирования

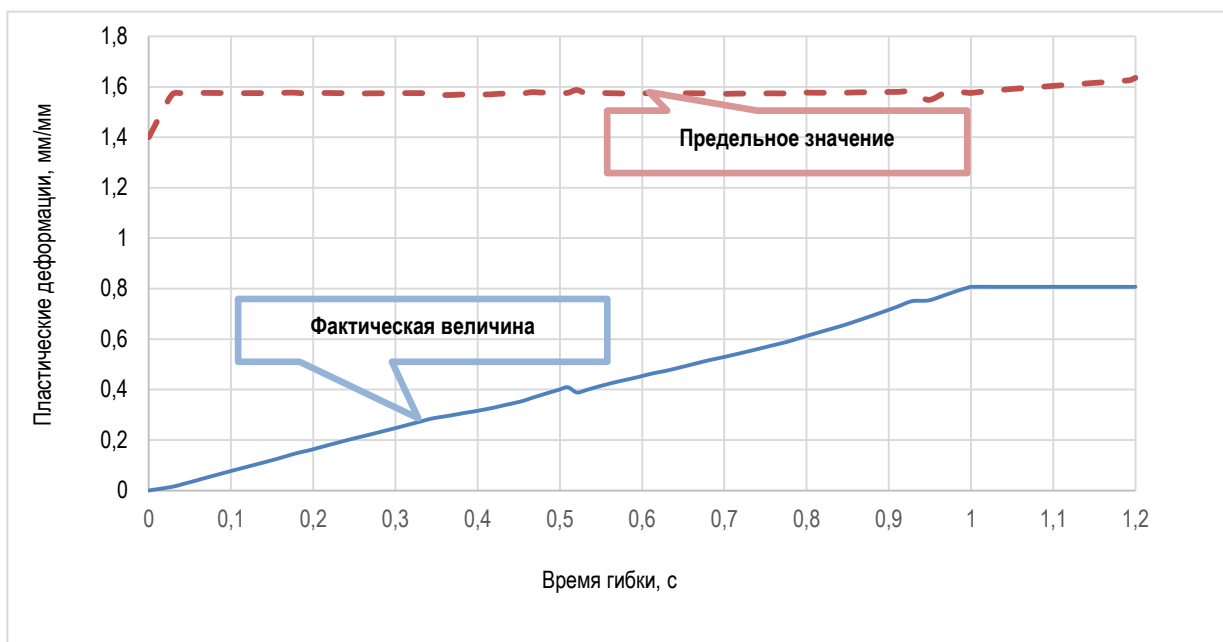


Рисунок 7 – График пластического деформирования изделия

Как видно из представленного рисунка, величина пластической деформации в процессе штамповки не превышает значений предельно допустимого значения определенному с использованием метода Джонсона-Кука, что гарантирует отсутствие повреждений изготавливаемого кронштейна.

3. Анализ результатов.

Основными данными, необходимыми для корректной разработки штампового оборудования, являются величина необходимого усилия

на пуансоне и геометрия штамповой оснастки. Результаты моделирования изготовления кронштейна путем пластического деформирования представлены на рисунках 8–11.

На рисунке 8 представлен характер изменения величины относительной пластической деформации и величины усилия на пуансоне от времени осуществления рабочего и части обратного хода достаточного для учета обратного пружинения.

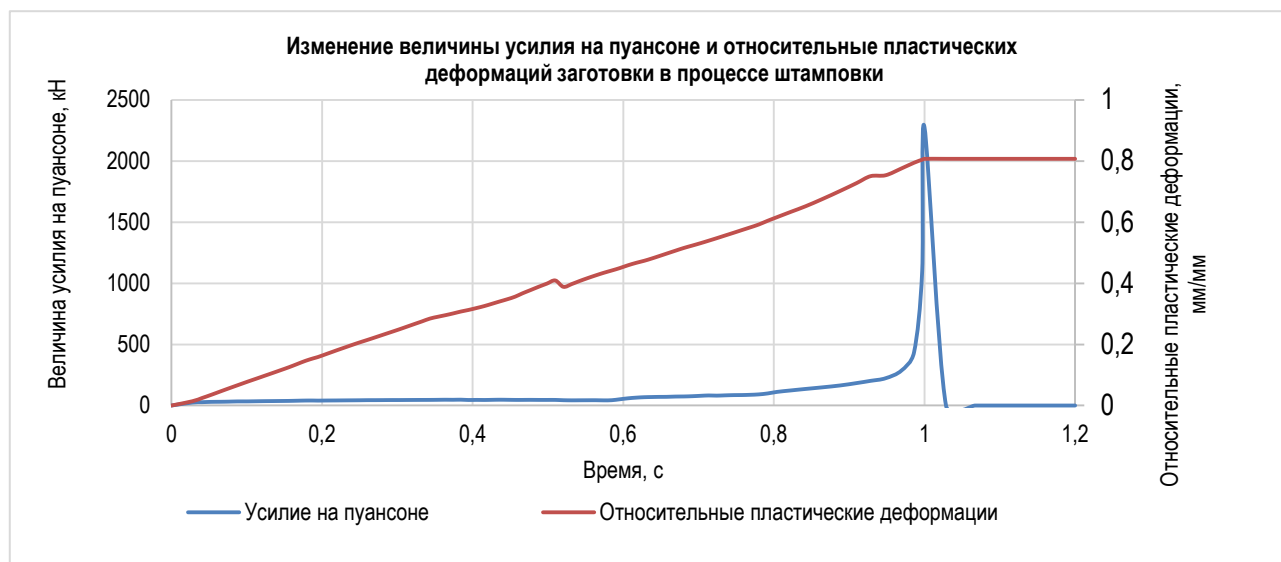


Рисунок 8 – Усилие на пуансоне и пластические деформации в процессе штамповки

Как следует из приведенного рисунка 8, усилие на пуансоне составило 2275 кН, а величина относительной пластической деформации 0,78 мм/мм.

На рисунке 9 показана динамика деформирования заготовки с дискретизацией по относительной величине рабочего хода пуансона в виде картин распределения относительных пластических деформаций.

На рисунке 10 приведены картины распределения зон контактного взаимодействия объекта штамповки и штамповой оснастки.

На рисунке 11 представлено сопоставление геометрии кронштейна в ходе математического моделирования и реально изготов-

ленного объекта, полученного путем штамповки, с применением определенных параметров геометрии штамповой оснастки и силовых параметров взаимодействия пуансона и объекта гибки.

Реальная 3D-модель геометрии кронштейна, изготовленного путем штамповки, получена методом лазерной триангуляции с использованием многофункционального ручного 3D-сканера Shining Free scan UE Pro. Расхождение реальной геометрии и полученной путем проведения математического моделирования (см. рисунок 11) лежит в области допусков на изготовление изделия.

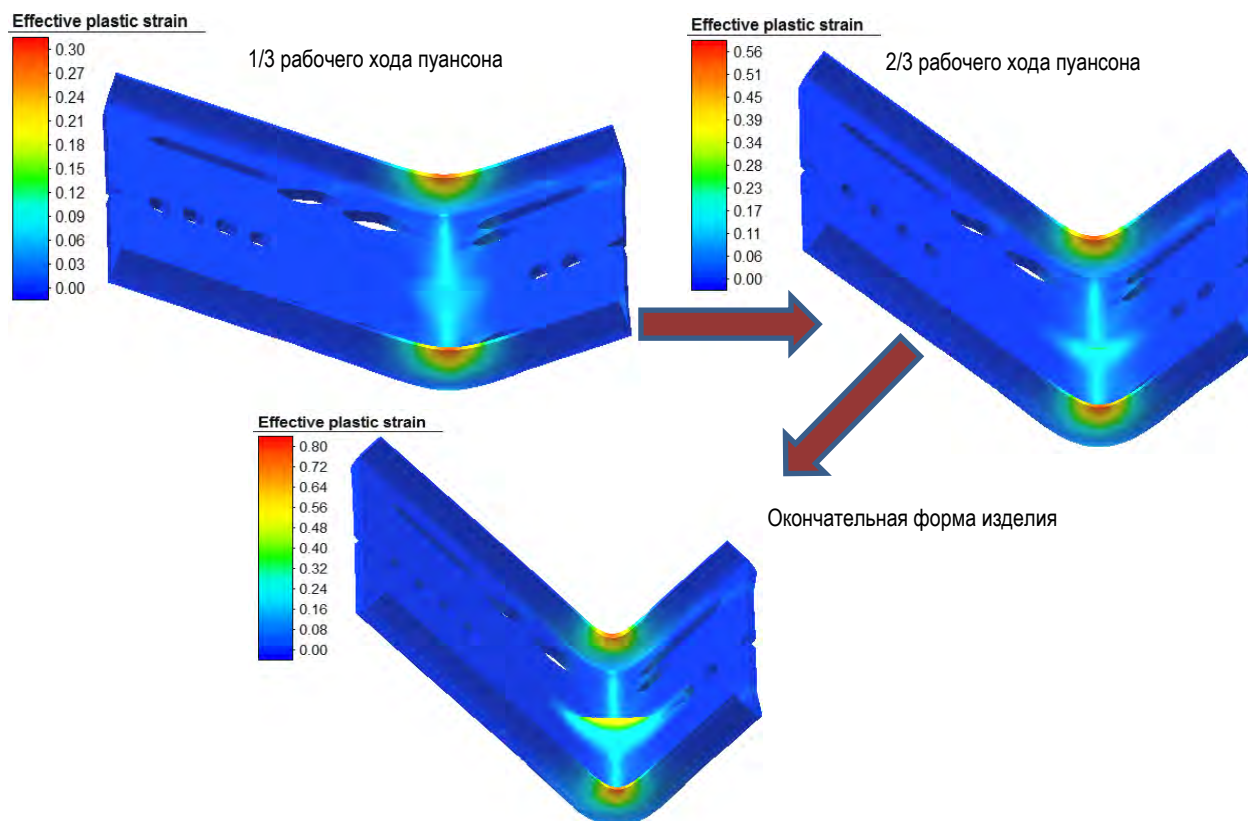


Рисунок 9 – Фазы деформирования заготовки

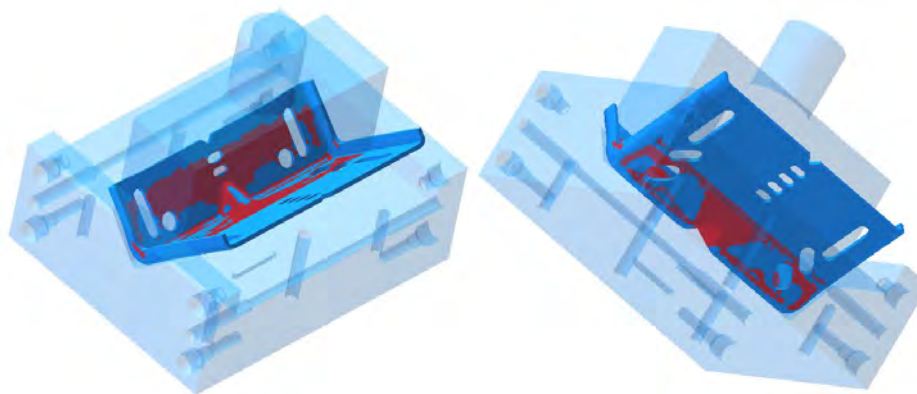
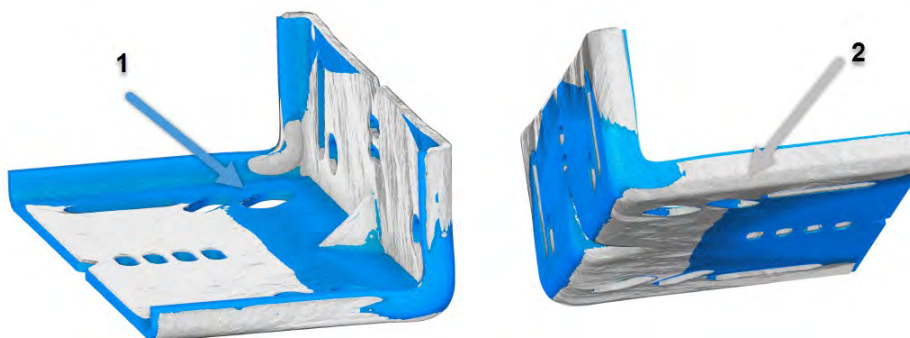


Рисунок 10 – Области контактирования заготовки и оснастки



1 – результат моделирования; 2 – реальная геометрия

Рисунок 11 – Сопоставление геометрий реального кронштейна и после процесса моделирования

Заключение

Математическое моделирование технологического процесса штамповки кронштейна установки направляющих позволило:

- проверить и довести формообразующие поверхности оснастки для получения кронштейна согласно конструкторской документации;
- определить необходимо усилие штамповки и выбрать прессовое оборудование;
- определить необходимый ход пуансона с учетом эффекта обратного пружинения;
- проверить отсутствие повреждаемости листового материала на основании метода Джонсона-Кука.

Проверка работоспособности кронштейна, спроектированного с использованием описанного подхода, была выполнена испытаниями в составе реального лифта с контролем возникающих напряжений методом тензометрии проволоочными тензорезисторами [4].

Таким образом, были реализованы процессы математического моделирования технологического процесса штамповки кронштейна для получения годного изделия доведением формы заготовки и ее предварительного изготовления, что позволило за одну итерацию провести подготовку производства.

Список цитированных источников

1. Выбор конструкции детали как определяющий фактор технологичности и себестоимости ее изготовления на примере деталей ограничителя скорости лифта, получаемых лазерной резкой вместо их отливки с последующей механической обработкой / Т. В. Лапцевич [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 3(76). – С. 52–59. – https://doi.org/10.53078/20778481_2022_3_52. – EDN: GBNYMV.
2. Schäfer, M. Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods / Michael Schäfer. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 321 p.

3. Gomah, M. An Experimental and Numerical Investigation of an Improved Shearing Process with Different Punch Characteristics / Mahmud Gomah, Murat Demiral // Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 66, Iss. 6. – P. 375–384.
4. Методические принципы проектирования кронштейнов крепления лифтовых направляющих / В. Н. Ключков [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – 2022. – Т. 11. – С. 74–79. – EDN: DAQDMI.

References

1. Vybor konstrukcii detali kak opredelyayushchij faktor tekhnologichnosti i sebestoimosti ee izgotovleniya na primere detalej ogranichatelya skorosti lifta, poluchaemyh lazernoj rezkoj vmesto ih otlivki s posleduyushchej mekhanicheskoj obrabotkoj / T. V. Lapcevich [i dr.] // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. – 2022. – № 3(76). – S. 52–59. – https://doi.org/10.53078/20778481_2022_3_52. – EDN: GBNYMV.
2. Schäfer, M. Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods / Michael Schäfer. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 321 p.
3. Gomah, M. An Experimental and Numerical Investigation of an Improved Shearing Process with Different Punch Characteristics / Mahmud Gomah, Murat Demiral // Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 66, Iss. 6. – P. 375–384.
4. Metodicheskie principy proektirovaniya kronshtejnov krepeleniya liftovyh napravlyayushchih / V. N. Klochkov [i dr.] // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. – 2022. – T. 11. – S. 74–79. – EDN: DAQDMI.

Материал поступил 05.06.2024, одобрен 12.06.2024, принят к публикации 12.06.2024