

УДК 621.981.12

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА
НЕЙТРАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ГИБКЕ МОМЕНТОМ**© 2021 А.О. Кузин¹, Я.А. Ерисов^{1,2}, В.А. Разживин¹, И.Н. Петров¹¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия² Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 18.01.2022

В работе приведены результаты экспериментального определения радиуса нейтральной поверхности при гибке моментом и их сравнение с теоретическими значениями. Для этого разработана методика определения деформаций при двухугловой гибке при помощи системы Vic-3D, работающей на основе корреляции цифровых изображений (DIC). Определена погрешность измерений и ограничение разработанной методики.

Ключевые слова: гибка моментом, нейтральная поверхность, корреляция изображений, деформация, погрешность.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-5-10

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных параметров процесса гибки моментом является положение нейтральной поверхности, отделяющей зоны растяжения и сжатия, так как данный параметр используется при теоретическом расчете деформаций и напряжений, а значит и предельных деформаций, и силовых условий процесса гибки, а также упругого пружинения.

При разработке технологических процессов листовой гибки и расчете заготовки чаще всего принимается плоское напряженное и деформированное состояния, и рассматривается теория чистого изгиба, предусматривающая равномерное искривление отдельных слоев металла под действием изгибающего момента и пренебрегающей действием поперечных растягивающих сил. Упрочнением материала при гибке тоже часто пренебрегают.

Однако, в реальности гибка всегда сопровождается скольжением металла по деформирующему инструменту, обуславливающим появление сил трения и создающим в металле сложное нагружение в виде пластического изгиба с растяжением, что в совокупности с упрочнением

влияет на положение нейтральной поверхности, вынуждая опытным путем корректировать технологию изготовления гнутых деталей.

Наиболее известными теоретическими работами, посвященными определению нейтральной поверхности при гибке, являются исследования И.П. Рене, Р. Хилла, Е.А. Попова, В.П. Романовского и др., использовавших метод равенства радиальных напряжений растянутых и сжатых слоев заготовки и отличающихся учетом различных параметров процесса [1-5].

В работе [6] рассматривается вопрос определения радиуса нейтральной поверхности изгибаемой полосы при одновременном действии растягивающих напряжений с уточнением распределения контактных напряжений, действующих от внутренней поверхности к центру кривизны, и разрабатывается теория сложного изгиба, позволяющая уточнить радиус нейтральной поверхности в условиях растяжения изгибаемой полосы дополнительными тангенциальными напряжениями.

В работе [7] показано влияние анизотропии пластических свойств на напряженно-деформированное состояние при гибке, в частности, установлено, что радиус нейтральной поверхности не зависит от анизотропии свойств.

Все рассмотренные работы [1-7] содержат только теоретический вывод уравнений для расчета радиуса нейтральной поверхности. В них поставлены общие эксперименты, подтверждающие достоверность отдельных положений разработанных теорий гибки. Экспериментальных же исследований, посвященных именно определению положения нейтральной поверхности, обнаружить не удалось.

Кузин Александр Олегович, заведующий лабораторией обработки металлов давлением.

E-mail: alexandrkuzin88@gmail.com

Ерисов Ярослав Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru

Разживин Василий Андреевич, аспирант.

E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru

Петров Илья Николаевич, аспирант.

E-mail: ilpetrof110895@yandex.ru

В связи с этим, в данной статье приведены результаты эксперимента, позволяющего напрямую измерить радиус нейтральной поверхности при гибке и оценить погрешность классических уравнений для расчета радиуса нейтральной поверхности.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве деформирующего оборудования использовалась универсальная испытательная машина TIRAtest 28300 (Германия, максимальное усилие 300 кН) с установленными плоскими бойками на сжатие. Для анализа деформированного состояния, а также определения положения радиуса нейтрального слоя использовалась система бесконтактного измерения деформаций Vic-2D (CorrelatedSolutionLtd, США), работа которой основана на методике корреляции цифровых изображений [8-10].

По данному методу деформации определяются через перемещения точек поверхности измеряемого объекта во время эксперимента. Для этого используется специально нанесенный на поверхность детали спекл-рисунок. При этом анализируется относительное смещение нанесенных точек в небольших областях по всему изображению. Программное обеспечение вычисляет поле перемещений по всей поверхности объекта, что позволяет точно рассчитать поле деформаций.

В качестве деформирующего инструмента был спроектирован и изготовлен однооперационный штамп для двухугловой гибки, схема и размеры которого представлена на рисунке 1.

Рабочие элементы штампа (матрица, пуансон) изготовлены из стали У10. Для того чтобы заготовка деформировалась только в результате действия изгибающего момента (чистый изгиб), образец крепился к пуансону.

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы из алюминиевого сплава 8011А (Al 98,07-98,36%; Si 0,7-0,8%; Fe 0,7-0,8%; Cu 0,03-0,06%; Mn 0,05%; Mg 0,02-0,08%; Cr 0,03%; Zn 0,05%; Ti 0,05%; Be 0,0001%) размерами 125x60x6 мм. После чего на их торцы при помощи специальных трафаретов был нанесен спекл-рисунок с размерами точек $D = 0,18$ мм, 0,33 мм, 0,66 мм, 1,27 мм (рисунок 2) для последующего анализа образца при помощи системы Vic-2D. Точки различного размера наносились для определения их влияния на погрешность экспериментального измерения радиуса нейтральной поверхности.

Скорость перемещения траверсы на испытательной машине задавалась равной 5 мм/мин. Испытания проводились без нанесения смазки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После проведения испытаний при помощи системы Vic-3D были получены картины распределения деформаций в тангенциальном и радиальном направлениях (рисунок 3). Полученное деформированное состояние полностью соответствует классической теории гибки: вблизи внутреннего радиуса действуют отрицательные тангенциальные деформации, то есть происходит сжатие волокон в этой области, а на внешнем радиусе - положительные, то есть во-

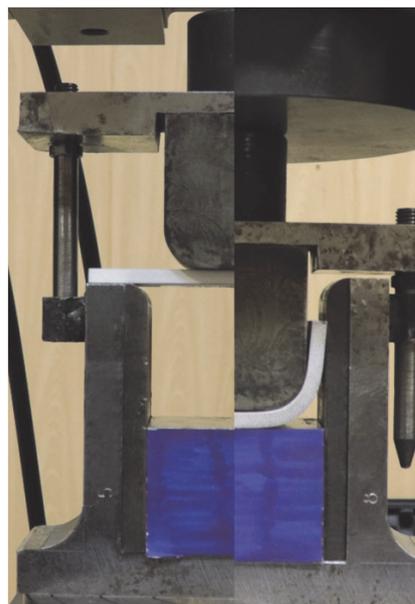
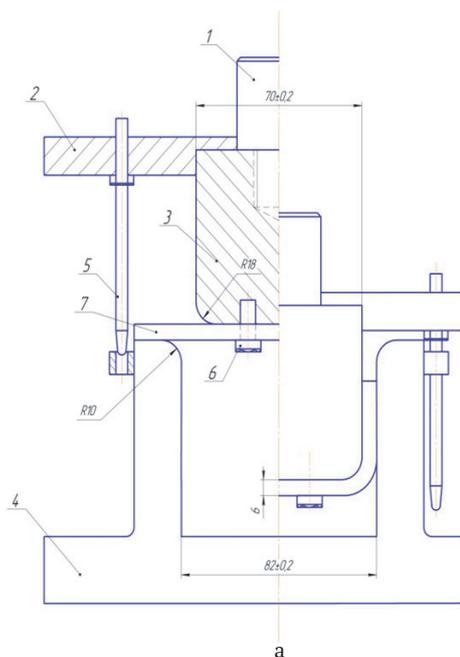


Рисунок 1 – Штамповая оснастка:

- 1 – хвостовик; 2 – верхняя плита; 3 – пуансон;
4 – нижняя плита и матрица; 5 – направляющая колонка; 6 – болт;
7 – заготовка (слева – в открытом состоянии, справа – в закрытом)

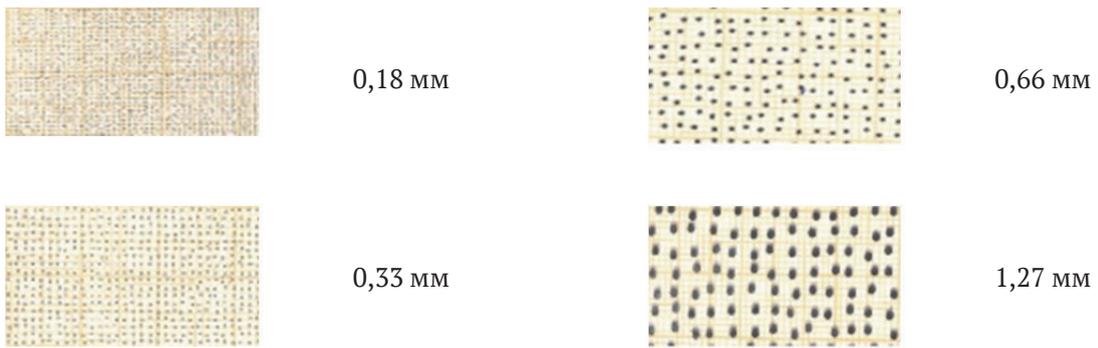
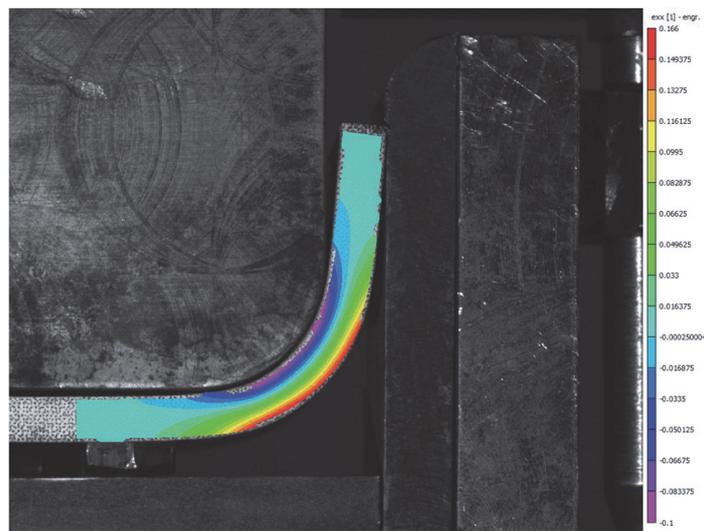
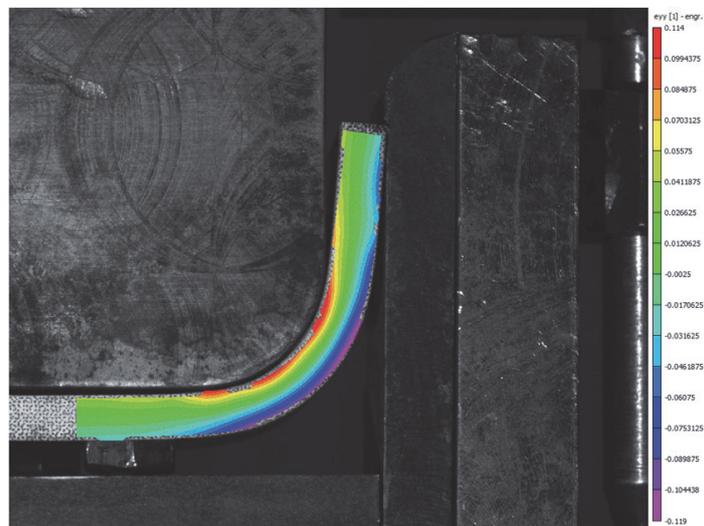


Рисунок 2 – Размеры наносимых точек спекл-рисунка



а



б

Рисунок 3 – Распределение тангенциальной (а) и радиальной (б) деформаций ($D=0,18$ мм)

локна растягиваются. Обратная картина наблюдается для радиальных деформаций.

На рисунке 4 приведен график распределения тангенциальной деформации ϵ_θ и радиальной деформации ϵ_r в радиальном направлении. Данные кривые пересекаются с осью абсцисс при нулевых значениях деформаций. При этом деформации изменяют свой знак, то есть точка

их пересечения отделяет зону сжатия от зоны растяжения и определяет радиус нейтральной поверхности. Таким образом, можно определить величину радиуса кривизны нейтральной поверхности при гибке.

На рисунке 5 представлена зависимость радиуса кривизны нейтральной поверхности от размера точек спекл-рисунка. Как видно из рисунка

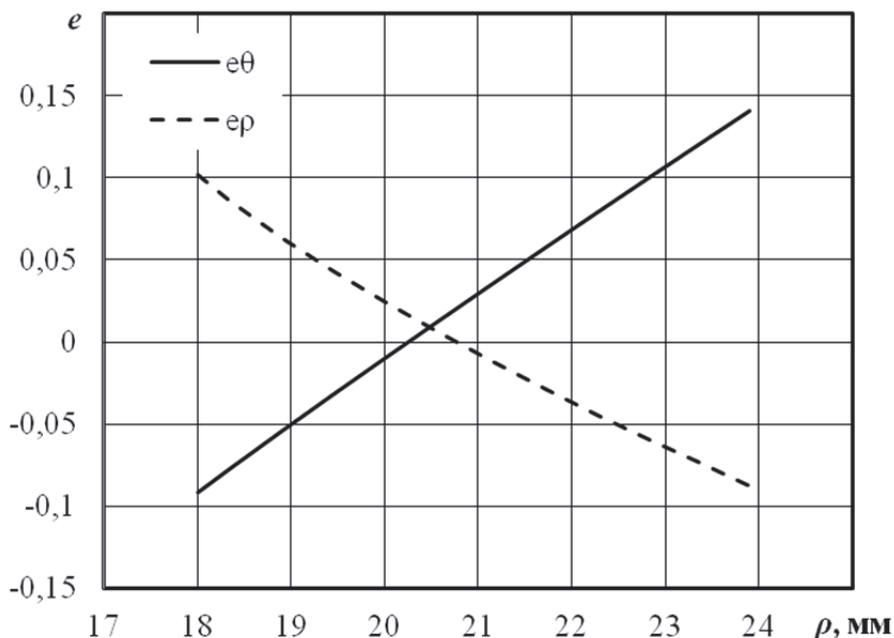


Рисунок 4 – Зависимость радиальной и тангенциальной деформаций от текущего радиуса ($D = 0,18$ мм)

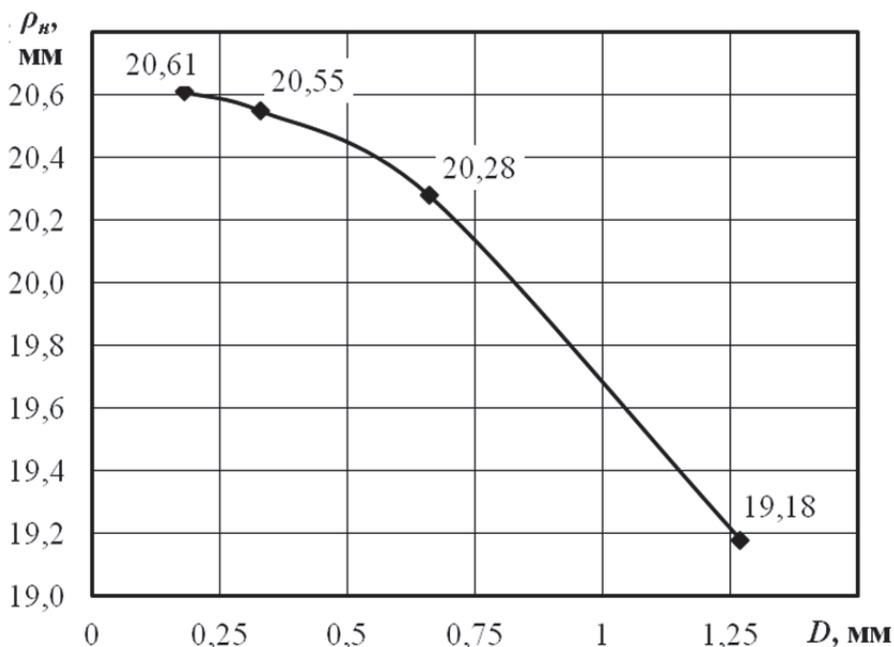


Рисунок 5 – График изменения радиуса кривизны нейтральной поверхности в зависимости от размера точки спекл-структуры

5, с уменьшением размера точек спекл-рисунка радиус между соседними значениями измеренного радиуса нейтральной поверхности уменьшается, что свидетельствует о повышении точности измерений. Так относительное отклонение значений, полученных при $D=0,18$ мм и $0,33$ мм, составляет $0,29\%$ и очевидно, что дальнейшее уменьшение радиуса точек спекл-рисунка к ощутимому увеличению точности не приведет.

Принимая экспериментально измеренное при $D=0,18$ мм значение радиуса кривизны ней-

тральной поверхности, равное $20,61$ мм, за исходное, определим погрешность измерения Δ при других размерах точек спекл-рисунка (рисунок 6). Из рисунка 6 можно определить ограничения разработанной методики экспериментального измерения радиуса кривизны нейтральной поверхности при гибке моментом. Так для обеспечения 5% инженерной погрешности необходимо, чтобы D/S было меньше или равно $0,18$ мм. Тогда, учитывая, что минимальный размер точек спекл-рисунка для системы VIC составляет $0,18$

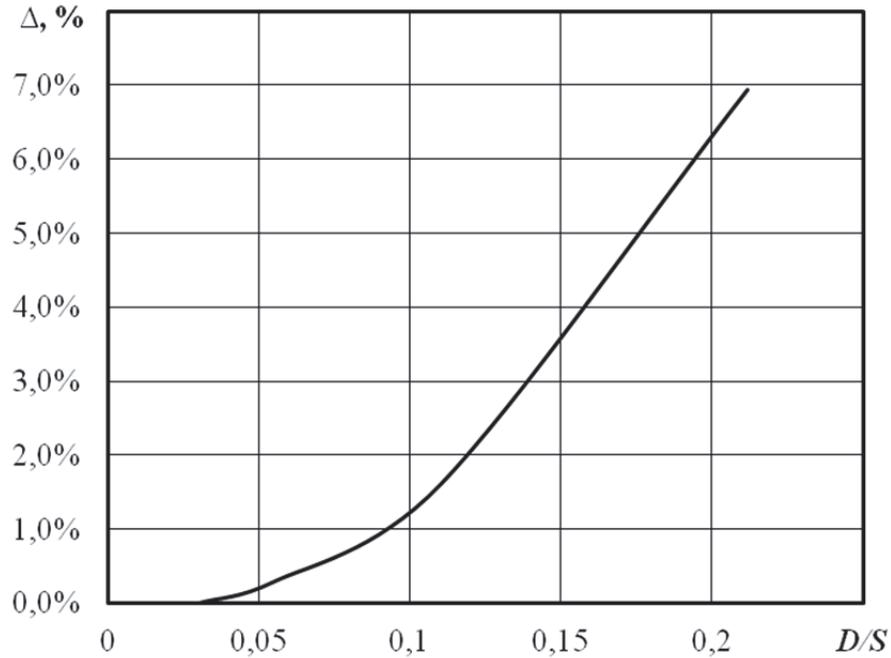


Рисунок 6 – Погрешность измерения радиуса нейтральной поверхности в зависимости от отношения размера точек спекл-рисунка к толщине заготовки

мм, определим минимальную толщину заготовки, для которой измерение можно проводить с инженерной точностью – 1 мм.

Определим погрешность аналитически рассчитанной величины радиуса нейтральной поверхности по различным уравнениям [4, 11]:

$$\rho_n = \frac{R + r}{2} \alpha, \quad (1)$$

$$\rho_n = \sqrt{Rr}, \quad (2)$$

где R – наружный радиус изогнутой детали, мм; r – внутренний радиус изогнутой детали, мм; α – коэффициент утонения.

При расчетах по уравнениям (1)-(2) принимали, что внутренний радиус равен радиусу пуансона (r = 18 мм), так как изготовление детали осуществляется чистым изгибом. Наружный радиус можно вычислить по формуле:

$$R = r + S,$$

где S – это толщина заготовки (S = 6 мм).

Кроме того, рассмотрено два случая: утонение при гибке не происходит (α=1) и гибка с утонением α=0,992 [4]. Результаты расчетов значений и погрешности уравнений приведены в таблице 1.

Анализируя результаты, полученные аналитически и экспериментально, можно сделать вывод, что разница между значениями не превышает 2 % и является следствием использованных при выводе аналитических выражений допущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование систем бесконтактного измерения деформаций, работающих на основе метода корреляции цифровых изображений,

Таблица 1. Сравнение теоретического и экспериментального радиусов нейтральной поверхности

Формула	Источник	Теоретическая величина ρ _н , мм	Погрешность Δ (для D = 0,18мм), %
$\rho_n = \frac{R + r}{2} \alpha, (\alpha = 1)$	[4]	21,0	1,89%
$\rho_n = \frac{R+r}{2} \alpha, (\alpha = 0,992)$	[4]	20,83	1,07%
$\rho_n = \sqrt{Rr}$	[11]	20,78	0,82%

позволяет экспериментально с высокой точностью определять деформированное состояние заготовки в процессе гибки моментом, что может быть использовано как в фундаментальных исследованиях процесса гибки, так и для уточнения таких параметров процесса как радиус нейтральной поверхности, утонение заготовки и т.д., знание которых необходимо для оптимизации технологии изготовления конкретных деталей, снижения упругого пружинения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысов, М.И. Формообразование деталей гибкой [Текст] / М.И. Лысов, Н.В. Сосов. - М.: Машиностроение, 2001. - 388 с.
2. Килов, А.С. Производство заготовок. Листовая штамповка: Серия учебных пособий из шести книг. Книга 2. Получение заготовок из листового материала и гнутые профили [Текст] / А.С. Килов, К.А. Килов. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. - 182 с.
3. Бурдуковский, В.Г. Технология листовой штамповки: учебное пособие [Текст] / В. Г. Бурдуковский. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. - 224 с.
4. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский. - Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1979. - 6 изд. - 520 с.
5. Ильин, Л.Н. Технология листовой штамповки: учеб. для вузов [Текст] / Л.Н. Ильин, И.Е. Семенов. - М.: Дрофа, 2009. - 475, [5] с.
6. Morozov, Yu.A., Verkhov E.Yu. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings, 2019, 15(2), 83–89.
7. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации) [Текст] / Ф.В. Гречников - М.: Машиностроение, 1998. - 448 с.
8. Третьяков, Т.В. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций [Текст] / Т.В. Третьяков, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман / Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. - 2011. - № 2. - С. 92 – 100.
9. Vic-3D Correlated Solutions. Руководство по проведению испытаний [Текст]. - 2009. - 64 с.
10. Vic-3D Correlated Solutions Справочное руководство [Текст] / 2010. - 109 с.
11. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. [Текст] / Е.А. Попов - М.: Машиностроение, 1977. - 278 с.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE NEUTRAL SURFACE RADIUS DURING PURE BENDING

© 2021 A.O. Kuzin¹, Ya. A. Erisov^{1,2}, V.A. Razzhivin¹, I.N. Petrov¹

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

The paper presents the results of the experimental determination of the neutral surface radius during bending by the moment and their comparison with theoretical values. For this, a method has been developed for determining strains during two-corner bending using the Vic-3D system, which operates on the basis of digital image correlation (DIC). The measurement error and the limitation of the developed technique are determined.

Key words: bending, moment, neutral surface, image correlation, strain, error.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-5-10

Alexander Kuzin, Head of Laboratory at the of Metal Forming Department. E-mail: alexandrkuzin88@gmail.com
Yaroslav Erisov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Metal Forming Department. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru
Vasily Razzhivin, Graduate Student at the Metal Forming Department. E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru
Ilya Petrov, Graduate Student at the Metal Forming Department. E-mail: ilpetrof110895@yandex.ru