

# Функциональная зависимость сопротивления деформации углеродистой стали 45 на основе натурального и вычислительного эксперимента\*

Галактионова Е.А., Петров П.А.  
Московский политехнический университет,  
г. Москва, Российская Федерация  
[ekaterina.mospu@mail.ru](mailto:ekaterina.mospu@mail.ru), [petrov\\_p@mail.ru](mailto:petrov_p@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье анализируются особенности формообразования неразъемного соединения двух заготовок пластической деформацией при комнатной температуре. Заготовки изготовлены из круглого проката углеродистой стали 20 и листового проката углеродистой стали 45. Обоснована необходимость определения функциональной зависимости для описания сопротивления деформации материалов неразъемного соединения. На основе натурального и вычислительного эксперимента установлена функциональная зависимость сопротивления деформации стали 45 для диапазона скорости деформации  $[0,001; 0,4] \text{ с}^{-1}$ . Точность функциональной зависимости оценивается значением коэффициентом детерминации  $R^2$  и составляет 0,9984. Показано последующее её применением в расчетной модели процесса формирования неразъемного соединения пластической деформации. Расчетная модель составлена в программном комплексе QForm. Выполнена оценка средней температуры в области контакта соединяемых заготовок.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, QForm, сопротивление деформации, неразъемное соединение, углеродистая сталь 45, функциональная зависимость сопротивления деформации.

## ВВЕДЕНИЕ

Использование в изделии неразъемных соединений в различных областях техники значительно снижает затраты дорогостоящих материальных ресурсов, снижает затраты на механическую обработку, но при этом сохраняет необходимый уровень надежности и работоспособности [1-4]. Для формирования неразъемных соединений все чаще используются методы, основанные на свойстве материала пластически деформироваться. Они позволяют соединять разнородные материалы без использования дополнительных материалов или клеев при комнатной температуре. При этом соединяемые компоненты представляют собой различные виды проката – листы, прутки, трубы. Формирование неразъемных неподвижных соединений методами пластического деформирования недостаточно изучено, и практических рекомендаций по проектированию таких технологических процессов, в частности, основанных на применении методов обработки давлением, не существует.

В настоящее время в литературе отсутствуют рекомендации по выбору технологических параметров при получении неразъемных соединений, выбору материалов соединяемых элементов, а также сведения по их прочности и долговечности. В связи с этим актуальным является разработка расчет-

ной модели процесса формообразования неразъемного соединения двух металлических заготовок методом пластического деформирования. При этом будем использовать программный комплекс QForm. Разработанный ООО «Квантор-Форм» программный комплекс применяется для моделирования процессов обработки металлов давлением. Он позволяет получить высокую точность результатов и сократить расходы на проведении реальных экспериментов.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Один из способов получения неразъемного соединения показан на рис. 1 [11]. Формирование такого соединения исследуется в данной работе. В состав неразъемного соединения входит два компонента – бобышка и фланец. Бобышка представляет собой металлический прокат круглого сечения мерной длины из углеродистой стали 20. Фланец представляет собой шайбу с центральным профильным отверстием из листового проката из углеродистой стали 45. В штампе бобышка располагается в центре фланца, и при осадке бобышки пуансонами осуществляется формирование неразъемного соединения (см. рис. 1). Процесс осадки, т. е. образование неразъемного соединения, происходит при комнатной температуре.

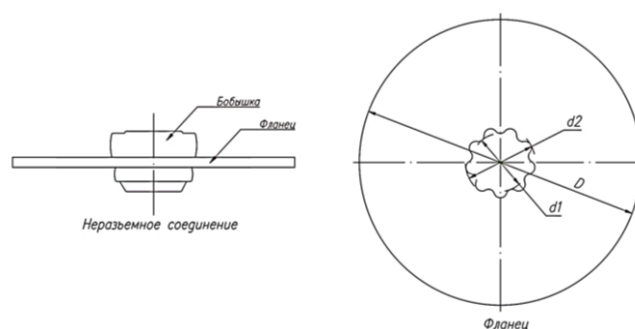


Рис. 1. Неразъемное соединение

Для получения адекватных результатов расчетной модели необходимо подготовить исходные данные, соответствующие реальному процессу. Важной характеристикой при формировании неразъемного соединения методом пластического деформирования является сопротивление деформации используемых материалов. В базе данных материалов программного комплекса QForm представлены функциональные зависимости для описания сопротивле-

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

ния деформации различных материалов при разных температурах и скоростях деформации. Также имеются таблично заданные функциональные зависимости сопротивления деформации для используемых в исследуемом процессе углеродистых сталей при следующих областях значений термомеханических параметров:

- 1) для температуры – [20; 300] °C;
- 2) для скорости деформации – [0,01; 500] с<sup>-1</sup> (для стали 20) или [0,01; 100] с<sup>-1</sup> (для стали 45);
- 3) для деформации – [0,04; 2,00].

Сравнивая результаты моделирования при использовании материалов из базы данных программного комплекса QForm по форме центрального профильного отверстия фланца, можно сделать вывод о их несоответствии результатам натурального эксперимента [1]. Материал фланца – углеродистая сталь 45.

В связи с этим, целью данной статьи является установление функциональной зависимости для описания сопротивления деформации углеродистой стали 45 от скоростных параметров при температуре 20 °C на основе проведения испытаний сжатием цилиндрических образцов.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Текст статьи набирается в настоящем шаблоне с использованием предложенных стилей. Изменение полей, отступов, интервалов, ширины столбцов, размера шрифтов недопустим

Для проведения испытаний из листового горячекатаного проката (марка стали – углеродистая сталь 45) были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 5 мм и высотой 5 мм. Механические испытания проводили на испытательной машине LMF250 без применения технологической смазки при температуре 20°C при постоянной скорости деформации. Скорость деформации принималась равной 0,001 с<sup>-1</sup>, 0,01 с<sup>-1</sup>, 0,4 с<sup>-1</sup>.

На рис. 2 показаны расчетные программы нагружения, обеспечивающие постоянную скорость деформации.

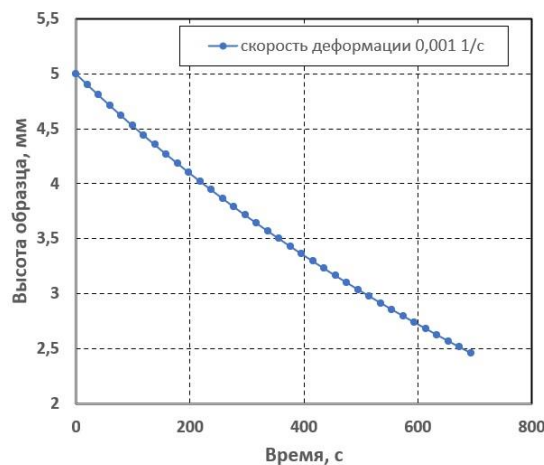
Каждый образец подвергался сжатию на 50% от исходной высоты. Далее в соответствии с методикой, изложенной в работе [5, 6] рассчитывается изменение напряжения текучести за счет контактного трения и теплового эффекта пластической деформации. После этого выполняется расчет изотермической кривой упрочнения для скорости деформации в диапазоне значений 0,001-0,4 с<sup>-1</sup>. В исследуемом процессе начальная скорость деформации ~0,04 с<sup>-1</sup>.

Полученная изотермическая кривая отражает изменение напряжения текучести только вследствие действия в деформируемом материале процессов, связанных с его упрочнением-разупрочнением, хотя при температуре 20°C роль разупрочнения практически отсутствует и ей можно пренебречь. В нашем случае материал – сталь 45 – проявляет склонность к упрочнению с разной интенсивностью по мере увеличения значения деформации.

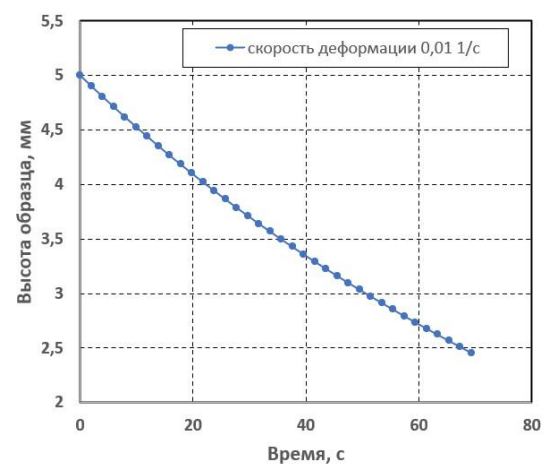
Кривые упрочнения, полученные для значений скорости деформации из диапазона [0,001; 0,4] с<sup>-1</sup> являются исходными данными для определения функциональной зависимости напряжения текучести от величины деформации, температуры и скорости деформации. Взаимосвязь между этими параметрами может быть выражена формулой Хензеля-Шпиттеля (1), применяемой в программе QForm для задания реологической модели материала:

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_2} \varepsilon_i^{m_3} \exp\left(\frac{m_4}{\varepsilon_i}\right) (1 + \varepsilon_i)^{m_5 T} \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_8} \varepsilon_i^{m_8 T}, \quad (1)$$

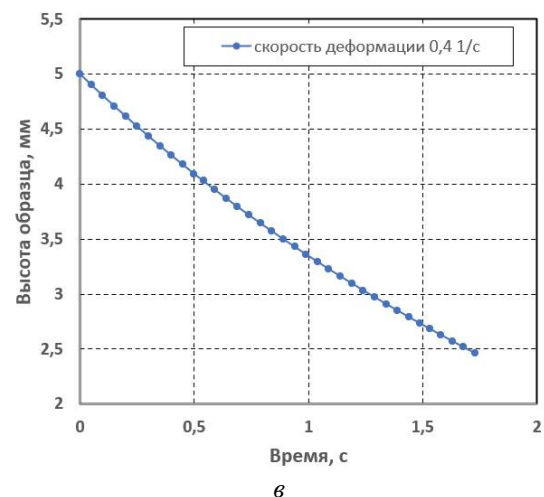
где  $A, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$  – коэффициенты, характеризующие поведение материала в заданных термомеханических условиях его деформирования.



а



б



в

Рис. 2. Расчетные программы нагружения для выбранных испытательных машин: а – для скорости деформации 0,001 с<sup>-1</sup>; б – для скорости деформации 0,01 с<sup>-1</sup>; в – для скорости деформации 0,4 с<sup>-1</sup>

Для решения задачи о поиске значений коэффициентов (регрессии) использована пользовательская подпрограмма [7], в которой применена функция «lsqcurvefit» из библиотеки Matlab, реализующая метод Левенберга–Маркардта. Алгоритм подпрограммы основан на методе решения обратной задачи (inverse analysis) [8-10]; точность модели оценивается коэффициентом детерминации R<sup>2</sup>. Значения коэффициентов формулы (1) представлены в табл. 1; значения коэффициентов корреляции для диапазона скоростей деформации [0,001; 0,4] с<sup>-1</sup> – также в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов в формуле (1) для стали 45 при температуре 20°C

Температура деформации	A	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>
20°C	10,226	0,235	0,415	0,0265	-0,0464
	m <sub>5</sub>	m <sub>7</sub>	m <sub>8</sub>	m <sub>9</sub>	
	-0,255	2,51	-0,000763	0,2279	
Скорость деформации, с <sup>-1</sup>					
	0,001	0,01	0,4	[0,001; 0,4]	
Значение R <sup>2</sup>	0,9984	0,9987	0,9979	0,9984	

Расчет по формуле (1) позволяет получить значения сопротивления деформации с минимальным расхождением от экспериментальных значений. На рис. 3 показано сравнение экспериментальных изотермических кривых упрочнения с расчетными кривыми упрочнения стали 45.

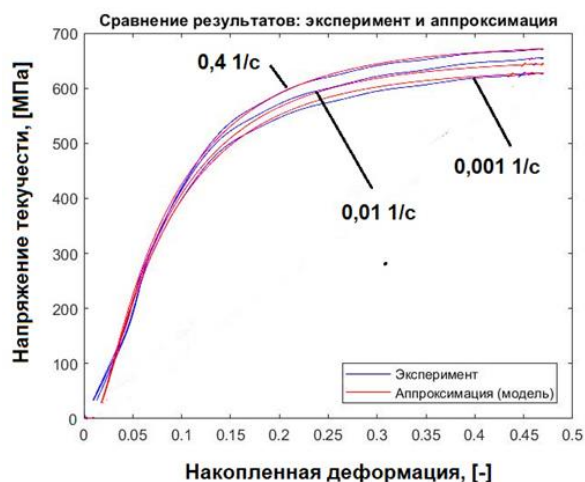


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных изотермических кривых упрочнения стали 45

Реологическая модель стали 20 при температуре 20°C определяется из базы данных материалов программы QForm и представлена на рис. 4.

Результаты моделирования формообразования неразъемного соединения двух компонентов, полученные в программном комплексе QForm, показаны на рис. 5-6. Результаты расчетной модели имеют некоторые отличия от результатов натурального эксперимента (см. рис. 5). Моделирование в QForm показывает неполное заполнение впадин профильного отверстия фланца материалом бобышки и значительную деформацию выступа профильного отверстия (см. рис. 5).

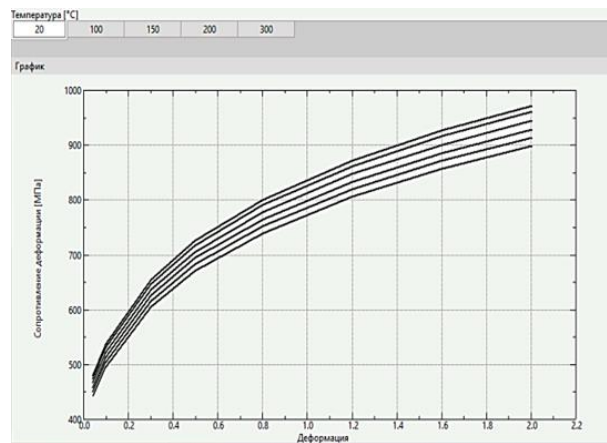


Рис. 4. Модель сопротивления деформации стали 20

В натурном эксперименте при осадке материал бобышки заполняет профиль отверстия фланца, при этом профиль отверстия фланца деформируется незначительно (рис. 5). На начальном этапе формирования соединения сталь 20 имеет меньшее значение сопротивления деформации, чем сталь 45. В процессе холодного деформирования материал бобышки упрочняется, значение сопротивления деформации стали 20 возрастает. В месте соединения бобышки и фланца наблюдается утолщение фланца. Визуально деформация фланца при моделировании в QForm отличается от деформации фланца в натурном эксперименте.

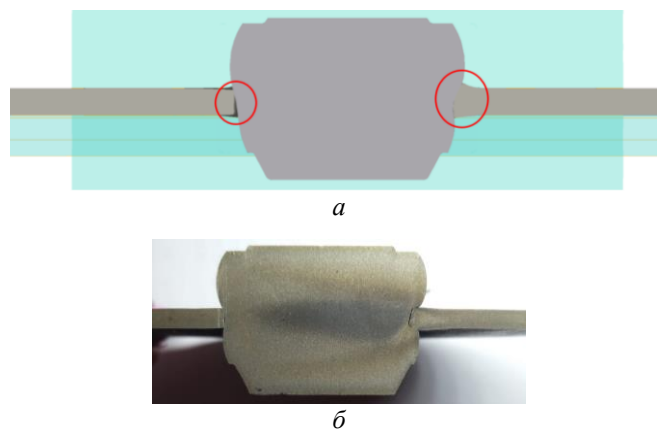


Рис. 5. Неразъемное соединение: а – моделирование в QForm; б – натуральный эксперимент

Материалы фланца и бобышки разные, соответственно имеют разные значения сопротивления деформации. Но в процессе совместного деформирования материал обеих заготовок упрочняется. Процесс упрочнения сопровождается повышением температуры из-за теплового эффекта (рис. 6б). Вследствие теплового эффекта пластической деформации температура по сечению каждой заготовки увеличивается тем больше, чем больше значение накопленной деформации. Так, по расчетным данным в области формирования соединения бобышки и фланца (см. рис. 6б; выделено окружностью желтого цвета) температура составляет в среднем: 104,2°C (для бобышки, сталь 20) и 64,05°C (для фланца, сталь 45).

Материал бобышки упрочняется в большей степени (рис. 6), и значение сопротивления деформации стали 20

приближается к значениям сопротивления деформации стали 45. Это приводит к деформации кромки профильного отверстия фланца (см. рис. 5); в натурном эксперименте деформация кромки практически не наблюдается, что может свидетельствовать о меньшем повышении температуры и неточности описания зависимости сопротивления деформации стали 20.

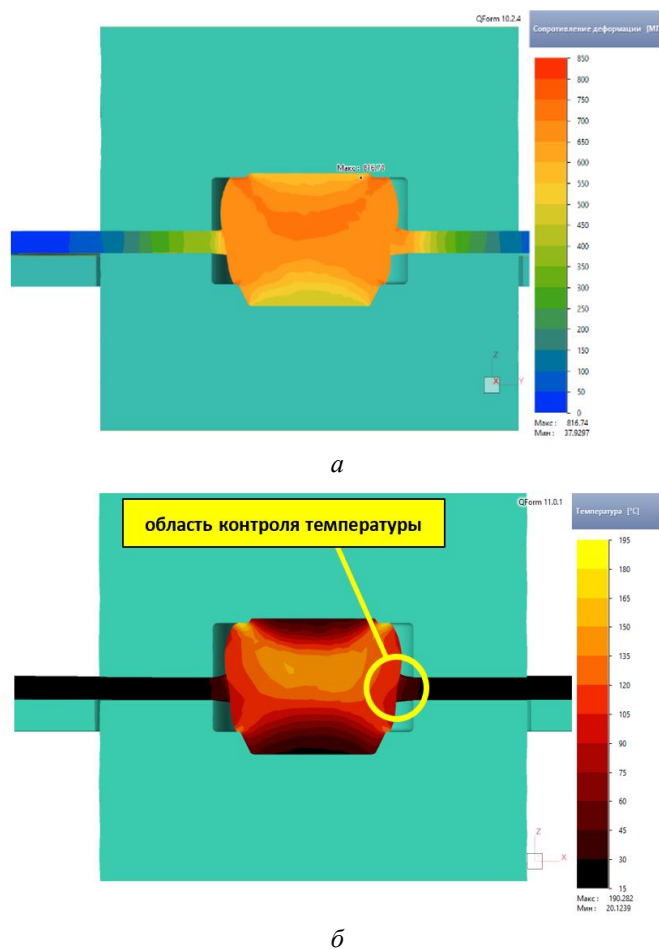


Рис. 6. Поля распределения параметров напряженно-деформированного состояния: а – поле сопротивления деформации; б – поле температуры

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Текст статьи набирается в настоящем шаблоне с использованием предложенных стилей. Изменение полей, отступов, интервалов, ширины столбцов, размера шрифтов недопустимо.

1. Установлена функциональная зависимость для описания сопротивления деформации углеродистой стали 45 от скоростных параметров в диапазоне значений  $0,001-0,4 \text{ с}^{-1}$  при комнатной температуре. Из решения задачи регрессии определены коэффициенты математической модели. Область значений деформации, для которой получена модель –  $[0,02; 0,50]$ . При большем значении деформации в процессе формирования неразъемного соединения расчет сопротивления деформации производится по последнему значению  $\sigma$ , соответствующему значению деформации 0,50.

2. Полученная в данной работе математическая модель стали 45 применена для компьютерного моделирования

формирования неразъемного соединения заготовки углеродистой стали 20 с заготовкой из стали 45 пластическим деформированием в условиях холодной деформации. Выполненное пробное компьютерное моделирование в программе QForm показало некоторую ограниченность полученной модели углеродистой стали 45 и модели углеродистой стали 20, выбранной из базы данных материалов расчетной программы (см. рис. 5).

3. Форма кромки профильного отверстия фланца и форма боковой поверхности бобышки различны в натурном эксперименте и расчетной модели процесса формообразования неразъемного соединения. Выявленные отличия связаны с выбранной моделью стали 20 и, отчасти, модели стали 45, полученной в данной работе.

4. Деформированная заготовка из стали 45 имеет незаполненное профильное отверстие и в большей степени деформированный выступ профильного отверстия. Для корректировки расчетной модели необходимо расширить область значений температуры до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  в установленной функциональной модели (формула (1) и табл. (1)).

5. Деформированная заготовка из стали 20 при осадке полностью не заполнила профильное отверстие фланца. Для корректировки расчетной модели необходимо установить функциональную зависимость для описания сопротивления деформации стали 20 в диапазоне значений: температуры  $20-300 \text{ }^\circ\text{C}$ ; деформации  $0,02-0,5$  и скорости деформации  $0,001-0,4 \text{ с}^{-1}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Галактионова Е.А. Исследование процесса соединения заготовок пластическим деформированием. Выпускная квалификационная работа магистра. – М.: Московский политех, 2023. – 84 с.
2. Alves L.M. Joining sheets to rods by boss forming / L.M. Alves, R.M. Afonso, P.A.F. Martins // CIRP Annals. – 2019. – Vol. 68 (1). – P. 265-268.
3. Kitamura K. Cold joining of rotor shaft with flange by using plastic deformation / K. Kitamura, K. Hirota, Y. Ukai, K. Matsunaga, K. Osakada // CIRP Annals. – 2012. – Vol. 61(1). – P. 275-278.
4. Meschut G. Review on mechanical joining by plastic deformation / G. Meschut, M. Merklein, A. Brosius, et al. // Journal of Advanced Joining Processes. – 2022. – No. 5. – 100113.
5. Петров П.А. Моделирование программ монотонного нагружения с постоянной скоростью деформации на современной испытательной машине / П.А. Петров, В.Н. Фам, Б.Ю. Сапрыкин, У.Ш. Диксит // Технология легких сплавов. – 2021. – № 3. – С. 45-52.
6. Петров П.А. Методика исследования сопротивления деформации при двухэтапном монотонном нагружении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 157-174.
7. Петров П.А. Повышение надежности и эффективности измерений параметров деформации алюминиевых сплавов на универсальной испытательной машине / П.А. Петров, В.Н. Фам, И.А. Бурлаков и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 3. – С. 102-112.
8. Gawad J. Identification of Rheological Parameters on the Basis of Various Types of Compression and Tension Tests / J. Gawad, R. Kuziak, Ł. Madej, D. Szeliga, M. Pietrzyk // Steel Research International. – 2005. – Vol. 76. – P. 131-137.

9. Wang J. A new mathematical model for predicting flow stress up to the critical strain during hot deformation / J. Wang, H.T. Yang, X.G. Wang, H. Xiao // *Materials & Design*. – 2015. - Vol. 65. – P. 637-643.

10. Li L. Inverse analysis of the stress–strain curve to deter-

mine the materials models of work hardening and dynamic recovery / L. Li, B. Ye, S. Liu, S. Hu, B. Li // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 636. – P. 243-248.

11. Галиуллов Р.Ш., Кочетов А.А. Способ неразъемного соединения // Патент России №2368482. 2009. Бюл. №27.

DOI: 10.24892/RIJIE/20240410

# Functional Dependence of Flow Stress of Carbon Steel 45 Based on Laboratory and Computational Experiment

Galaktionova E.A., Petrov P.A.

Moscow Polytechnic University,  
Moscow, Russian Federation

[ekaterina.mospu@mail.ru](mailto:ekaterina.mospu@mail.ru), [petrov\\_p@mail.ru](mailto:petrov_p@mail.ru)

**Abstract.** This article analyzes the features of the formation of a mechanical joining of two workpieces by plastic deformation at room temperature. The blanks are made from a raw of low carbon steel 20 and rolled sheets of carbon steel 45. The need to determine the functional relationship to describe the flow stress of these materials is substantiated. Based on full-scale and computational experiments, the functional dependence of the flow stress of steel 45 was established for the strain rate range  $[0.001; 0.4] \text{ s}^{-1}$ . The accuracy of the functional dependence is estimated by the coefficient of determination  $R^2$  and is 0.9984. Its subsequent application in the

calculation model of the process of forming the joining due to plastic deformation is shown. The calculation model was implemented into the QForm software package. The estimation of the average temperature in the contact area of the workpieces being joined was carried out.

**Keywords:** computational simulation, QForm, flow stress, mechanical joining, low-carbon steel 45, functional dependence of flow stress.

---

## Библиографическое описание статьи

Галактионова Е.А. Функциональная зависимость сопротивления деформации углеродистой стали 45 на основе натурального и вычислительного эксперимента / Е.А. Галактионова, П.А. Петров // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2024. – Т.11, №4. – С. 63-67. DOI: 10.24892/RIJIE/20240410

## Reference to article

Galaktionova E.A., Petrov P.A. Functional Dependence of Flow Stress of Carbon Steel 45 Based on Laboratory and Computational Experiment, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2024, vol.11, no.4, pp. 63-67. DOI: 10.24892/RIJIE/20240410

---