

Научная статья

УДК 620.172.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31209>



Д.Р. Кравцов¹ ✉, К.С. Арсентьева¹,
В.С. Мамутов¹, А.А. Степанов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² АО «Морион», Санкт-Петербург, Россия

✉ kravtsov.dr@gmail.com

КОМБИНИРОВАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛА «КОВАР-МЕДЬ»

Аннотация. В статье описан опыт производства по разработке технологического процесса изготовления детали «Основание» из биметалла «Ковар-Медь» толщиной 0,18 мм. Приведены примеры дефектов, возникающих при изготовлении детали по технологическому процессу, который был аналитически рассчитан при помощи выведенных аналитических методик. Показаны необходимость компьютерного моделирования основных операций, с помощью которых изготавливается деталь «Основание», а также потребность в определении механических свойств материала заготовки. Приведены способ испытания на растяжение нестандартизированных образцов и вариации оснастки, которые могут быть использованы для получения различных механических свойств, а также дефекты испытаний, которые могут при этом возникнуть из-за относительно небольшой толщины образцов. Разработана и отлажена компьютерная модель для получения механических свойств биметалла, которые невозможно получить при экспериментальных испытаниях, а также описаны перспективы применения данной модели для определения свойств многослойных материалов, состоящих из двух и более слоев. Приведены механические свойства биметалла «Ковар-Медь», полученные из экспериментальных и компьютерных исследований.

Ключевые слова: листовая штамповка, биметалл, механические свойства, компьютерное моделирование.

Для цитирования:

Кравцов Д.Р., Арсентьева К.С., Мамутов В.С., Степанов А.А. Комбинированные испытания для определения механических свойств биметалла «Ковар-Медь» // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 114–124. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31209>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31209>

D.R. Kravtsov¹ ✉, X.S. Arsentyeva¹,
V.S. Mamutov¹, A.A. Stepanov²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² Morion, Inc., St. Petersburg, Russia

✉ kravtsov.dr@gmail.com

COMBINED TESTS FOR DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF KOVAR-COPPER BIMETAL

Abstract. The article describes the production experience in developing a technological process for manufacturing the “Header” part made of 0.18 mm thick Kovar-Copper bimetal. Examples of defects arising during the manufacture of the part according to the technological process, which was analytically calculated using the derived analytical methods, are given. The need for computer modeling of the main manufacturing operations for production of “Header” part, as well as the need for determination of mechanical properties of the blank material is shown. A method of tensile testing of non-standard samples and variants of tooling that can be used for determination of different mechanical properties are given, as well as test faults that can occur due to small thickness of samples. A computer model for determination of mechanical properties of the bimetal that cannot be obtained by experiment is developed and adjusted; the prospects for using the model for determination of properties of multilayer materials consisting of two or more layers are described. The mechanical properties of the Kovar-Copper bimetal obtained from experimental and computer studies are given.

Keywords: sheet metal forming, bimetal, mechanical properties, computer modeling.

Citation:

Kravtsov D.R., Arsentyeva X.S., Mamutov V.S., Stepanov A.A., Combined tests for determination of mechanical properties of Kovar-Copper bimetal, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 114–124, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31209>

Введение. На предприятие АО «Морион» поступило техническое задание об изготовлении детали «Основание» из биметалла «Ковар-Медь» (29НК-М1) толщиной 0,18 мм (рис. 1). Биметаллические материалы получили широкое применение в современном производстве при изготовлении как деталей, так и инструментов [1]. Зачастую использование биметаллических материалов направлено на улучшение технологических свойств изделий, а также на повышение экономической эффективности [2]. Использование биметаллического материала в данном случае обусловлено, с одной стороны, заданными требованиями к определенным механическим характеристикам (коэффициент температурного расширения), а с другой – необходимостью холодного диффузионного сваривания с ответной деталью из меди. Кроме того, сталемедный композиционный сплав обладает сочетанием высокой прочности и достаточной пластичности для осуществления операций вытяжки.

Традиционно подобного типа детали можно изготовить при помощи листовой штамповки в инструментальном штампе, в частности – способом вытяжки из ленты, с применением операций калибровки и вырубки¹. Для расчета технологического процесса производства деталей подобного типа (овальные коробочки с фланцем) существует ряд выведенных методик, связанных с определением допустимых радиусов закругления, коэффициентов вытяжки, получаемой

¹ Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Ленинград, 1979.

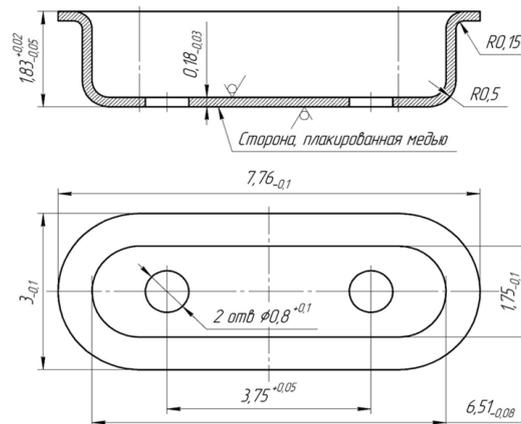


Рис. 1. Эскиз детали «Основание»
 Fig. 1. Sketch of the “Header” part

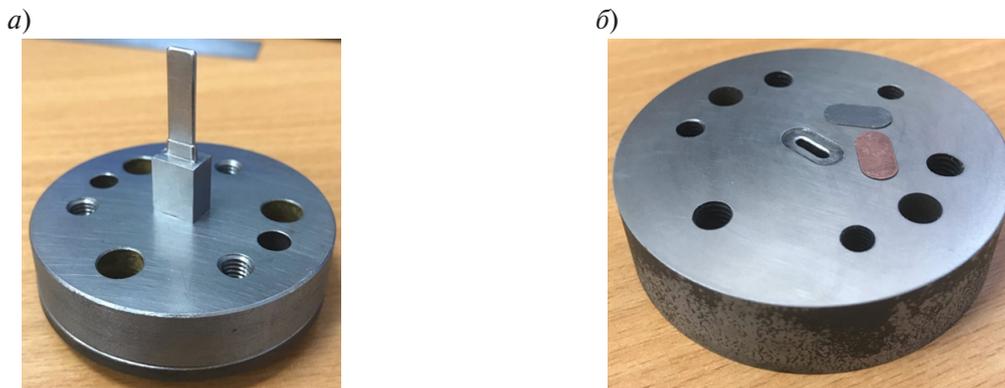


Рис. 2. Опытная оснастка для изготовления детали «Основание»: *а* – верхняя половина пакета штампа с пуансоном в сборе; *б* – нижняя половина пакета штампа с матрицей
 Fig. 2. Experimental tooling for manufacturing the “Header” part:
a – the upper die assembly with a punch; *b* – the lower die assembly with a matrix

высоты полуфабрикатов и т.д. Размеры и форма заготовки были определены при помощи дополненного метода по определению центров тяжести образующих детали [3] и оптимизированы в дальнейшем до формы эллипса.

После аналитического расчета технологии была изготовлена опытная штамповая оснастка (рис. 2) и был проведен ряд испытаний по получению требуемой детали «Основание». Однако изготовить деталь без дефектов не удалось: полуфабрикат получался либо недостаточной высоты, либо с недопустимым утонением на радиусе донного закругления, либо с нарушением сплошности материала и трещинами. В итоге попытки получить деталь привели к заклиниванию инструмента и поломке пуансона (рис. 3).

После ряда неудач при опытном изготовлении детали было принято решение отработать технологию с помощью компьютерного моделирования, которое достаточно часто применяется для данных целей в наши дни и позволяет при варьировании различных параметров определять вероятность возникновения дефектов [4–7]. Однако для создания компьютерной модели процесса требуется задание механических свойств материала, таких как модуль Юнга, предел прочности, предел текучести, коэффициент Пуассона, параметры аппроксимации кривой деформационного упрочнения и др. Среди справочной литературы большинство характеристик

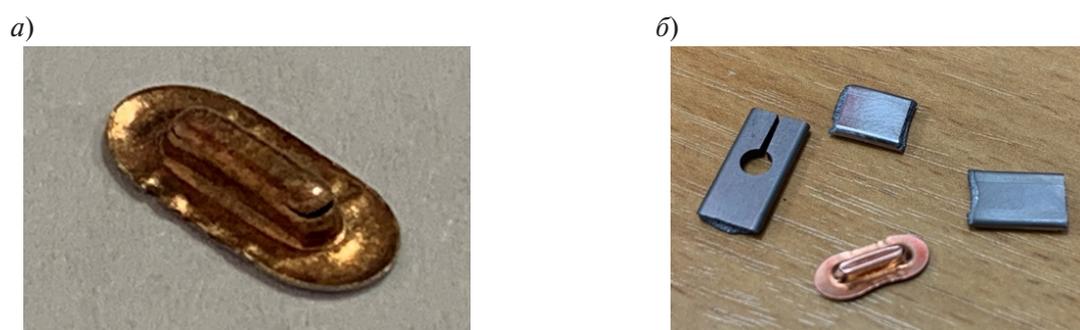


Рис. 3. Результаты изготовления детали «Основание» на опытной оснастке: *a* – деталь с разрывом на донном закруглении; *б* – деталь с трещиной на длинной стороне стенки и обломки пуансона

Fig. 3. Results of manufacturing the “Header” part using experimental tooling:

a – a part with fracture at bottom radius; *b* – a part with wall-side crack and broken punch fragments

для биметалла «Ковар-Медь» отсутствует, однако имеются сведения о составляющих композита (29НК и М1), поэтому было принято решение получить все требуемые для моделирования механические свойства путем экспериментальных испытаний и компьютерного моделирования.

Цель данной работы – описать методики и результаты испытаний и моделирования и привести механические свойства биметалла «Ковар-Медь» 29НК-М1.

Практические методы

Традиционно механические свойства листовых металлов можно получать при помощи испытаний образцов на растяжение и рассчитывать механические характеристики согласно методикам, описанным в ГОСТ 1479–84 и ГОСТ 11701–84, которые применяются для биметаллов [8, 9], а также в других схожих испытаниях [10]. Поскольку толщина испытываемого материала значительно меньше минимально допустимой толщины образца, рекомендуемой в ГОСТ 11701–84 (0,5 мм), было принято решение использовать нестандартизированные образцы, так как форма и размер образцов не оказывают влияния на показатели относительного удлинения и предела прочности материала [11, 12]. В целях экономии материала применялся образец, который был пропорционально уменьшен в два раза относительно стандартизированного образца по ГОСТ 11701–84 и был ранее испытан в экспериментальных исследованиях механических свойств меди М1 и МНЦ15-20 [13].

Испытания велись при помощи разрывной машины Tinius Olsen 5ST с применением самозатягивающегося зажимного устройства (рис. 4а) для образцов, вырезанных вдоль, поперек и под углом 45° к направлению проката для определения коэффициента анизотропии (рис. 5а, б).

Как уже отмечалось ранее в работе [13], в связи с относительно малой толщиной материала наблюдалось скольжение образцов в начале приложения нагрузки, что не позволило корректно рассчитать модуль Юнга по стандартной методике. Для получения упругого участка кривой деформационного устройства использовалась специальная крепежная оснастка (рис. 4б), которая позволяла исключить скольжение, что помогло при испытаниях, описанных в работе [13], однако при испытаниях биметалла «Ковар-Медь» в первую очередь происходила пластическая деформация крепежных участков образца, нежели упругая деформация зоны измерений (рис. 5в). Подобный эффект сохранялся при испытании образцов с толщиной 0,15, 0,2 и 0,25 мм из биметалла «Ковар-Медь», которые имелись на производстве.

В связи с этим было принято решение применить компьютерное моделирование для определения модуля Юнга биметалла.

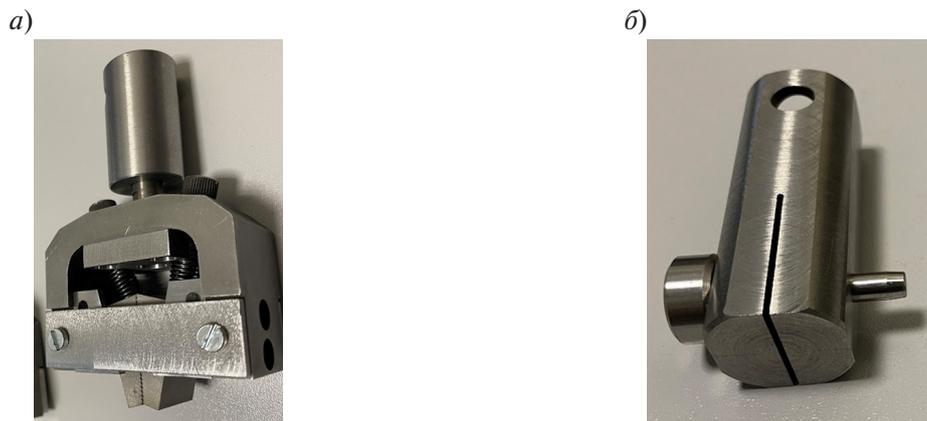


Рис. 4. Оснастка для испытаний на растяжение: *a* – зажимное устройство для испытаний на растяжения до разрыва; *б* – крепежное устройство для испытаний по определению модуля Юнга

Fig. 4. Tooling for a tensile test: *a* – the clamping device for a tensile-to-failure test; *b* – the fixture assembly for Young's modulus determination

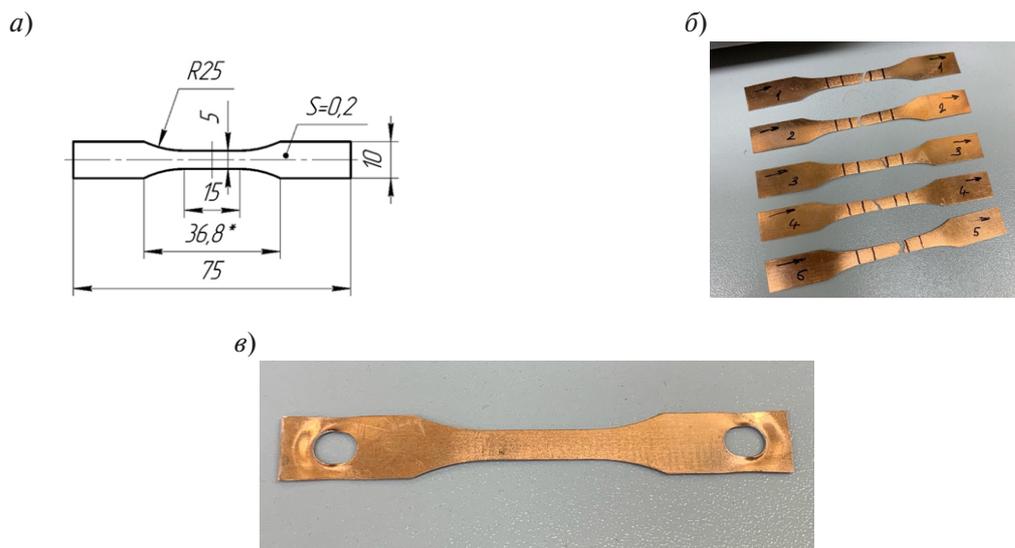


Рис. 5. Образцы из биметалла после испытаний: *a* – эскиз нестандартизированного образца для испытаний на растяжение; *б* – образцы, вырезанные вдоль проката; *в* – образец после испытаний для получения упругого участка кривой деформационного упрочнения

Fig. 5. Bimetallic samples after testing: *a* – sketch of non-standard sample for tensile test; *b* – samples cut along the rolling direction; *c* – post-test sample for determination of an elastic zone of the flow curve

Компьютерные методы

Компьютерная модель создавалась в конечно-элементном программном комплексе LS-DYNA [14], изначально разработанным для исследования высокоскоростных процессов. Однако при подборе времени счета данный комплекс позволяет считать и квазистатические процессы с минимальной погрешностью [5, 15].

В программе LS-DYNA решалась двухмерная задача. Геометрия образца задавалась двумя отдельными полосками металла длиной 1 мм и толщиной 0,06 мм для меди М1 и 0,12 мм для 29НК, которые соединялись в препроцессоре при помощи операции Boolean Glue. Для образца

механические свойства отдельных слоев (табл. 1). Выбиралась модель материала MAT_POWER_LAW_PLASTICITY. Один из концов образца жестко закреплялся, а к другому прикладывалась линейно возрастающая нагрузка, имитируя испытание на растяжение. Время счета принималось равным 0,1 с, что позволяет свести расчет в программе LS-DYNA к квазистатическому с минимальной погрешностью [15].

Таблица 1

Механические свойства, задаваемые в программу LS-DYNA

Table 1

Mechanical properties input into LS-DYNA software

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности, МПа	Параметр КДУ
29НК	8200	145	0,35	205	0,32
M1	8940	132	0,35	230	0,38

Далее созданную компьютерную модель необходимо было отладить. Основная задача отладки заключалась в следующем. Как уже было сказано ранее, в компьютерной программе считалась двухмерная задача, которая учитывала длину образца и толщину слоев. Однако для расчета модуля Юнга по ГОСТ 1497–2023 (п. 7.3) необходимо знать ширину образца для определения площади поперечного сечения. В компьютерной модели ширина образца не задавалась.

Для определения параметра ширины в первую очередь проводился калибровочный компьютерный расчет растяжения с двухслойной геометрией, но на оба слоя материала задавались характеристики одного металла. Первый расчет был проведен для двух слоев 29НК. Выбирался участок упругой деформации, где удлинение образца было прямо пропорционально увеличению нагрузки. Затем ширина образца подбиралась таким образом, чтобы расчетный модуль Юнга совпал с модулем Юнга, заданным для модели материала в программе (табл. 1). Расчет показал, что при ширине примерно 2,6 мм значения аналитического расчета и заданного параметра сходятся с погрешностью в 0,095%.

Второй аналогичный расчет (проверочный) проводился для двухслойной геометрии, где для материала обоих слоев задавались механические свойства меди M1. Ширина образца во втором расчете не подбиралась, а принималась равной 2,6 мм, как в первом случае. При этом расчетный модуль Юнга и заданный модуль Юнга при указанной виртуальной толщине образца совпали с погрешностью 0,077%.

Таким образом стала известна ширина виртуального образца, которая требуется для определения модуля Юнга биметалла. Стоит отметить, что для сходимости расчетов при определении ширины образца в калибровочном и проверочном моделировании по предлагаемой методике необходимо добиться того, чтобы характер нагружения и длительность счета были одинаковыми, а также использовать геометрическую модель с теми же размерами. В противном случае параметр ширины образца для разных материалов не совпадет, а определить модуль Юнга из расчета будет невозможно.

В третьем расчете для двухслойной геометрии задавались разные механические свойства отдельных слоев. Образец точно так же подвергался линейной нагрузке. Затем снимались характеристики удлинения в зависимости от приложенной нагрузки и выбирался участок упругой деформации, где удлинение прямо пропорционально увеличению нагрузки.

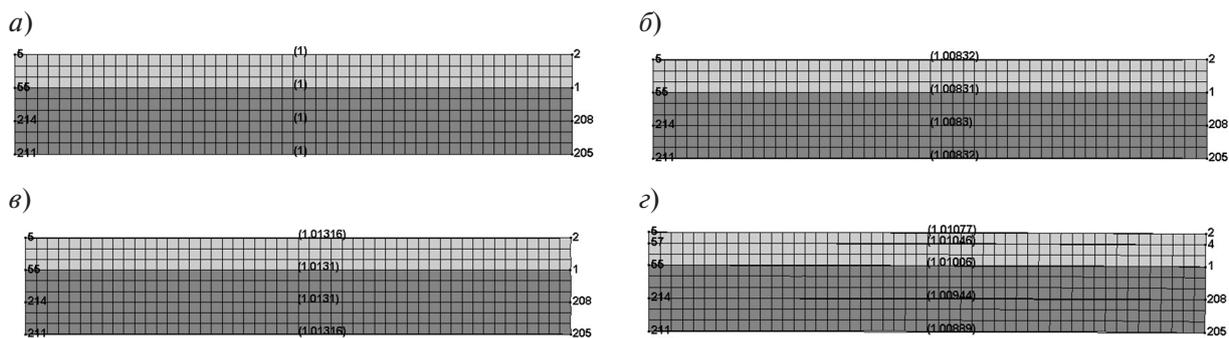


Рис. 6. Изменение геометрии двухслойных образцов в результате компьютерного моделирования до (а) и после приложения нагрузки (б–з): б – образец 29НК+29НК; в – образец М1+М1; з – образец М1+29НК

Fig. 6. Geometry evolution of bilayer samples in computational modeling before (a) and after loading (b–d): b – Kovar sample; c – copper sample; d – Kovar-Copper sample

Результаты и обсуждение

На рис. 6 представлены этапы компьютерного моделирования. На рис. 6а показан двухслойный образец до начала приложения нагрузки, а также четыре участка, с которых снимались измерения длины при отладке компьютерной модели.

На рис. 6б показан образец с заданными свойствами 29НК на обоих слоях, а на рис. 6в – образец с заданными свойствами меди М1. Поскольку на оба слоя задавались одинаковые свойства материала, то удлинение по мере приложения нагрузки в этих случаях будет идти равномерно на этапе упругой деформации.

На рис. 6з показан образец, на один слой которого задавались свойства меди М1, а на второй – 29НК. Поскольку свойства на слоях различные, то удлинение в различных плоскостях разное, а на определенном этапе моделирования, близком к началу пластической деформации, образец начал поворачиваться, отклоняясь от оси Y , вдоль которой прикладывалась нагрузка и проводились измерения. Связано это с тем, что при создании модели задавалась исключительно нагрузка, без зажимного устройства и подобной оснастки разрывной машины. При реальных испытаниях у образца нет возможности поворачиваться подобным образом.

В связи с этим удлинение измерялось в нескольких местах: на краях образца, на линии соединения и в середине каждого из слоев (рис. 6з). При расчете модуля Юнга на крайних границах образца были получены следующие значения: 130,82 ГПа для края слоя меди М1, что является заниженным значением в сравнении с номинальным модулем Юнга материала, и 150,56 ГПа для края слоя 29НК, что является завышенным значением в сравнении с номинальным значением модуля Юнга материала. Подобные значения опять-таки связаны с поворотом образца при моделировании.

Рассчитанный модуль Юнга для середины слоя меди М1 составил 132,56 ГПа (отклонение от номинального значения – 0,42%), для середины слоя 29НК – 145,08 ГПа (отклонение от номинального значения – 0,06%). На соединении слоев расчетный модуль Юнга составил 140,1 ГПа.

Далее рассчитывался средний модуль Юнга всего образца после расчетов третьего моделирования. С учетом значений на краях образца средний модуль Юнга составил 139,83 ГПа, а без учета данных значений – 139,25 ГПа.

Также общий модуль Юнга биметалла был рассчитан с учетом толщинного распределения слоев и номинальных механических свойств составляющих:

$$\frac{E_{M1} * s_{M1} + E_{29HK} * s_{29HK}}{s_{M1} + s_{29HK}} = \frac{132 * 0,06 + 145 * 0,12}{0,18} = 140,79 \text{ ГПа.}$$

Учитывая все полученные результаты, можно принять, что модуль Юнга биметалла в дальнейших технологических расчетах может быть приравнен к 140 ГПа.

По результатам экспериментальных и численных экспериментов была составлена таблица механических свойств биметалла «Ковар-Медь» (29НК-М1) (табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства биметалла «Ковар-Медь»

Table 2

Mechanical properties of “Kovar-Copper” bimetal

Параметр	Обозначение	Значение
Коэффициент упрочнения – описывает форму пластического участка кривой деформационного упрочнения, МПа	B	281
Степенной показатель кривой деформационного упрочнения (показатель упрочнения) – характеризует скорость упрочнения материала и его способность к растяжению	m	0,165
Плотность материала, кг/м ³	ρ	7867
Модуль Юнга (необходим для инкрементального решателя и при анализе пружинения), ГПа	E	140
Коэффициент Пуассона (необходим для инкрементального решателя и при анализе пружинения)	μ	0,35
Предел текучести – напряжение начала пластической деформации, МПа	σ_T	300
Предел прочности, МПа	σ_B	410
Относительное удлинение, %	δ	40
Коэффициент анизотропии по Ленкфорду	R	1,1

Заключение

В статье был рассмотрен опыт предприятия АО «Морион» по подготовке технологического производства детали «Основание». Показано, что аналитические расчеты по выведенным методикам не всегда позволяют с первого раза разработать технологической процесс производства детали. Показаны возможность применения нестандартизированных образцов для испытаний на растяжение и связанные с этим проблемы – в особенности проблемы проскальзывания тонколистового образца в зажимном устройстве и пластической деформации на крепежных концах образца, которая предшествует деформации зоны испытаний.

Показана методика, которая позволяет с помощью компьютерного моделирования определять модуль Юнга композиционных материалов. Разработана компьютерная модель процесса растяжения биметаллического материала. Показанная методика отличается относительной простотой, не требует завышенной квалификации расчетчика, машинных ресурсов и затрат на время счета. С помощью приведенной методики можно определять модуль Юнга композиционного материала, состоящего из двух слоев, а в перспективе – более чем из двух слоев, без существенного повышения трудоемкости.

Приведена таблица механических свойств биметалла «Ковар-Медь» 29НК-М1. Данные свойства как могут быть применены в учебном процессе, так и использоваться на промышленных предприятиях для отладки технологических процессов производства тонколистовых деталей из данного материала при помощи компьютерного моделирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Лаврентьев А.Ю., Какорин Д.Д., Барчуков Д.А.** Высокопроизводительный способ изготовления биметаллического дискового ножа // *Глобальная энергия*. 2023. Т. 29, № 3. С. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29307>
- [2] **Neulybin S.D., Belinin D.S., Terentyev S.A.** Comparative Analysis of Wear and Corrosion Attack Resistance of Bimetal Steel-Copper Products Manufactured by Plasma-Jet Hard-Facing with Direct and Reversed Polarity Current, *Procedia Engineering*, 206 (2017) 1401–1406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.652>
- [3] **Степанов А.А., Арсентьева К.С.** Применение метода Гюльдена-Паппуша в технологических расчетах для деталей сложной формы // *Перспективные машиностроительные технологии: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции*. 2023. С. 319–324.
- [4] **Арсентьева К.С., Мамутов В.С.** Учет скоростей деформации в программном комплексе LS-DYNA® при тонколистовой вытяжке // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2020. Т. 26, № 1. С. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.26103>
- [5] **Арсентьева К.С.** Проблема складкообразования при импульсной и квазистатической вытяжке-формовке тонколистовых деталей // *Научно-технические ведомости СПбПУ*. 2017. Т. 23, № 1. С. 190–199. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230119>
- [6] **Bandhavi Ch., Srinath E., Reddy Guru Charan I., Althaf M., Sri Bhargava Sai V.** Modelling and validation of sheet metal forming process of brass at elevated temperatures, *Materials Today: Proceedings*, 62 (6) (2022) 3336–3343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.244>
- [7] **Pesin A., Pustovoitov D., Biryukova O., Ilyina N.** FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect, *Procedia Manufacturing*, 50 (2020) 579–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.104>
- [8] **Bong H.J., Sung J.Y., Lee J., Kim M.H., Lee K.S.** Correlating mechanical properties of Al/Al bi-metal composite and its constituents using combined experiment and microstructure-based multiscale modeling approach, *Journal of Materials Research and Technology*, 31 (2024) 2037–2051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.219>
- [9] **Belinin D.S., Neulybin S.D., Schitsyn Yu.D.** Creating Composite Materials Based on High-Nickel Alloys with the Use of a Plasma Arc at Current Reverse Polarity, *Procedia Engineering*, 206 (2017) 1395–1400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.651>
- [10] **Zhang H.-B., Zhang L.-J., Liu J.-Z., Ning J., Zhang J.-X., Na S.-J., Zhu L.** Microstructures and performances of the butt joint of TA1/Q235B bimetallic sheet with addition of a Mo interlayer by using narrow gap laser welding with filler wire, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (5) (2020) 10498–10510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.054>
- [11] **Abedini A., Narayanan A., Butcher C.** An investigation into the characterization of the hardening response of sheet metals using tensile and shear tests with surface strain measurement, *Forces in Mechanics*, 7 (2022) 100090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2022.100090>
- [12] **Cruz D.J., Shamchi S.P., Santos A.D., Amaral R.L., Tavares P.J.** Moreira PMGP, Development of a mini-tensile approach for sheet metal testing using Digital Image Correlation, *Procedia Structural Integrity*, 25 (2020) 316–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.036>
- [13] **Кравцов Д.Р., Степанов А.А., Мамутов В.С., Арсентьева К.С.** Испытание нестандартизированных тонколистовых образцов на растяжение // *Металлообработка*. 2024. Т. 142, № 4. С. 10–19.
- [14] **Hallquist J.O.** LS-DYNA® Theory Manual. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2006. 498 p.
- [15] **Арсентьева К.С., Мамутов В.С.** Расчет процессов квазистатической формовки подвижными средами с применением комплекса LS-DYNA // *Неделя науки СПбПУ, материалы научно-практической конференции с международным участием*. 2014. Ч. 1. С. 114–117.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРАВЦОВ Дмитрий Романович – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: kravtsov.dr@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0915-5286>

АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: xenia.ars@xmail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4919-1325>

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

СТЕПАНОВ Андрей Александрович – инженер-конструктор, АО «Морион», без степени.

E-mail: stndr.ltd@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4825-4741>

REFERENCES

- [1] **A.Yu. Lavrent'ev, D.D. Kakorin, D.A. Barchukov**, High-performance method of manufacturing a bi-metallic disc knife, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 100–110, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29307>
- [2] **S.D. Neulybin, D.S. Belinin, S.A. Terentyev**, Comparative Analysis of Wear and Corrosion Attack Resistance of Bimetal Steel-Copper Products Manufactured by Plasma-Jet Hard-Facing with Direct and Reversed Polarity Current, *Procedia Engineering*, 206 (2017) 1401–1406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.652>
- [3] **A.A. Stepanov, X.S. Arsenyeva**, Application of Gulden-Pappush method in technological calculations for complex-shaped parts, *Perspektivnye mashinostroitel'nye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Advanced mechanical engineering technologies: Proceedings of the International scientific and practical conference]*, (2023) 319–324.
- [4] **X.S. Arsenyeva, V.S. Mamutov**, Strain rate influence on thin sheet metal drawing simulation using LS-DYNA®, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 26 (01) (2020) 29–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.26103>.
- [5] **X.S. Arsenyeva**, Wrinkling issues in thin sheet metal during impulse and quasi-static metal forming, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (1) (2017) 190–199. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230119>
- [6] **Ch. Bandhavi, E. Srinath, I. Reddy Guru Charan, M. Althaf, V. Sri Bhargava Sai**, Modelling and validation of sheet metal forming process of brass at elevated temperatures, *Materials Today: Proceedings*, 62 (6) (2022) 3336–3343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.244>
- [7] **A. Pesin, D. Pustovoitov, O. Biryukova, N. Ilyina**, FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect, *Procedia Manufacturing*, 50 (2020) 579–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.104>
- [8] **H.J. Bong, J.Y. Sung, J. Lee, M.H. Kim, K.S. Lee**, Correlating mechanical properties of Al/Al bi-metal composite and its constituents using combined experiment and microstructure-based multiscale modeling approach, *Journal of Materials Research and Technology*, 31 (2024) 2037–2051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.219>

[9] **D.S. Belinin, S.D. Neulybin, Yu.D. Schitsyn**, Creating Composite Materials Based on High-Nickel Alloys with the Use of a Plasma Arc at Current Reverse Polarity, *Procedia Engineering*, 206 (2017) 1395–1400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.651>

[10] **H.-B. Zhang, L.-J. Zhang, J.-Z. Liu, J. Ning, J.-X. Zhang, S.-J. Na, L. Zhu**, Microstructures and performances of the butt joint of TA1/Q235B bimetallic sheet with addition of a Mo interlayer by using narrow gap laser welding with filler wire, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (5) (2020) 10498–10510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.054>

[11] **A. Abedini, A. Narayanan, C. Butcher**, An investigation into the characterization of the hardening response of sheet metals using tensile and shear tests with surface strain measurement, *Forces in Mechanics*, 7 (2022) 100090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2022.100090>

[12] **D.J. Cruz, S.P. Shamchi, A.D. Santos, R.L. Amaral, P.J. Tavares**, PMGP Moreira, Development of a mini-tensile approach for sheet metal testing using Digital Image Correlation, *Procedia Structural Integrity*, 25 (2020) 316–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.036>

[13] **D.R. Kravtsov, A.A. Stepanov, V.S. Mamutov, K.S. Arsenyeva**, Ispytanie nestandardizirovannykh tonkolistovykh obraztsov na rastiazhenie [Tensile testing of non-standardized thin sheet specimens], *Metalworking*, 4 (142) (2024) 10–19.

[14] **J.O. Hallquist**, LS-DYNA® Theory Manual. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2006. 498 p.

[15] **K.S. Arsenyeva, V.S. Mamutov**, Raschet protsessov kvazistaticheskoi formovki podvizhnymi sredami s primeneniye kompleksa LS-DYNA [Calculation of quasi-static forming processes by moving media using the LS-DYNA complex], *Nedelia nauki SPbGPU, materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [SPbSPU Science Week, materials of the scientific and practical conference with international participation]*, 1 (2014) 114–117.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Dmitry R. KRAVTSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: kravtsov.dr@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0915-5286>

Xenia S. ARSENTYEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: xenia.ars@xmail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4919-1325>

Viacheslav S. MAMUTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Andrei A. STEPANOV – *Morion, Inc.*

E-mail: stndr.ltd@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4825-4741>

Поступила: 06.05.2025; Одобрена: 22.06.2025; Принята: 30.06.2025.

Submitted: 06.05.2025; Approved: 22.06.2025; Accepted: 30.06.2025.