

Особенности разработки технологий получения биметаллических полуфабрикатов инструментального назначения скоростным горячим выдавливанием

Докт. техн. наук, проф. И. В. Качанов¹⁾, С. А. Ленкевич¹⁾, В. В. Власов¹⁾, К. Ю. Быков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Наиболее актуальные вопросы развития техники включают в себя разработку технологических процессов, позволяющих при снижении себестоимости получать изделия с аналогичными или улучшенными эксплуатационными характеристиками. В этой связи весьма перспективны процессы пластического формоизменения металлов, в частности процессы скоростного горячего выдавливания, которые наряду с возможностью получать полуфабрикаты с минимальными припусками под механическую обработку также позволяют реализовать в том же технологическом процессе получение неразъемного биметаллического соединения разнородных сталей, что открывает новые возможности при производстве инструмента различного назначения. Целью данной работы являлась разработка лабораторных технологий получения различных типов биметаллических полуфабрикатов инструмента с возможностью экономии легированных сталей, применяемых в инструментальном хозяйстве, путем их замены (до 80–90 %) на конструкционные стали. По результатам проведенного аналитического обзора определено, что при разработке физико-математических моделей для скоростного горячего выдавливания удобно использовать метод верхней оценки, причем следует опираться на условие пластичности Губера–Мизеса и математический опыт термодинамики нестационарных процессов. Также определены критерии получения качественного биметаллического соединения путем деформационного воздействия при совместном пластическом течении. В результате экспериментальных исследований разработаны схемы деформирования и экспериментальная штамповая оснастка для реализации лабораторных технологий, установлены оптимальная геометрия составных заготовок и энергосиловые параметры, обеспечивающие как формообразование полуфабрикатов инструментального назначения, так и формирование биметаллического соединения разнородных сталей в их составе. Проведен качественный структурно-фазовый анализ с применением методик исследования микроструктуры и микротвердости полученных скоростным горячим выдавливанием биметаллических полуфабрикатов как в зоне биметаллического соединения, так и в общем объеме образцов. Полученные результаты продемонстрировали высокий потенциал для внедрения разработанных лабораторных технологий в промышленное производство.

Ключевые слова: биметалл, формообразование, скорость, модель, динамика, кинематика, мощность, инерция, нагружение, деформация, пластическое течение, штамп, шлиф, микроструктура, микротвердость

Для цитирования: Особенности разработки технологий получения биметаллических полуфабрикатов инструментального назначения скоростным горячим выдавливанием / И. В. Качанов [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 3. С. 192–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-192-203>

Features of Development of Technologies for Obtaining Bimetallic Semi-Finished Products for Instrumental Purposes by High-Speed Hot Extrusion

I. V. Kachanov¹⁾, S. A. Lenkevich¹⁾, V. V. Vlasov¹⁾, K. Y. Bykov¹⁾

¹⁾Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The most pressing issues in the development of technology include the development of technological processes that allow to obtain products with similar or improved performance characteristics while reducing cost. In this regard,

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

the processes of plastic forming of metals are very promising, in particular the processes of high-speed hot extrusion, which, along with the possibility of obtaining semi-finished products with minimal allowances for mechanical processing, also make it possible to implement in the same technological process the production of a permanent bimetallic connection of dissimilar steels, which opens up new possibilities in the production of tools for various purposes. The aim of this work was to develop laboratory technologies for obtaining various types of bimetallic semi-finished tool products with the possibility of saving alloy steels used in tool making by replacing them (up to 80–90 %) with structural steels. Based on the results of the conducted analytical review, it was determined that when developing physical and mathematical models for high-speed hot extrusion, it is convenient to use the upper estimate method, and one should rely on the Huber-Mises plasticity condition and the mathematical experience of thermodynamics of non-stationary processes. The criteria for obtaining a high-quality bimetallic compound by deformation action during joint plastic flow were also determined. As a result of experimental studies, deformation schemes and experimental die tooling for the implementation of laboratory technologies were developed, the optimal geometry of composite blanks and energy-force parameters were established, ensuring both the formation of semi-finished products for tool purposes and the formation of a bimetallic connection of dissimilar steels in their composition. A qualitative structural-phase analysis was carried out using methods for studying the microstructure and microhardness obtained by high-speed hot extrusion of bimetallic semi-finished products, both in the bimetallic joint zone and in the total volume of samples. The obtained results demonstrated high potential for the implementation of the developed laboratory technologies in industrial production.

Key words: bimetal, shaping, speed, model, dynamics, kinematics, power, inertia, loading, deformation, plastic flow, stamp, section, microstructure, microhardness

For citation: Kachanov I. V., Lenkevich S. A., Vlasov V. V., Bykov K. Y. (2025) Features of Development of Technologies for Obtaining Bimetallic Semi-Finished Products for Instrumental Purposes by High-Speed Hot Extrusion. *Science and Technique*. 24 (3), 192–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-3-192-203> (in Russian)

Введение

Главными условиями развития современной науки и техники являются снижение металлоемкости и повышение коэффициента использования металла, повышение удельной мощности применяемого оборудования и интенсификация технологических процессов.

Получение биметаллических полуфабрикатов с максимальной экономией инструментальных и высоколегированных сталей с наименьшей себестоимостью и снижением трудоемкости при последующей механической обработке – одна из главных задач машиностроения. Таким образом, перспективным направлением в области обработки металлов является внедрение технологических процессов скоростного горячего выдавливания (СГВ), которые позволяют наряду с формообразованием требуемого полуфабриката за один технологический переход формировать биметаллическое соединение из недорогих конструкционных сталей в композиции с более дорогостоящими инструментальными и высоколегированными сталями. В этом случае расход дорогостоящих материалов уменьшается на 80–90 %.

Исследование поведения металлов под действием кратковременных нагрузок, вызывающих нестационарные деформации в области пластического формоизменения, – актуальная

и сложная проблема в вопросах обработки металлов давлением. Для ее решения необходимо развитие математических и компьютерных моделей, а также экспериментальных методик и средств исследования быстропротекающих нестационарных процессов деформирования.

Основная часть

Изучение процессов СГВ металлических сплавов основывается на законе сохранения энергии, из которого вытекают уравнения движения сплошных сред, вследствие чего можно получить основные зависимости, описывающие скоростное выдавливание, и разработать физико-математические модели для определения основных технологических параметров. При разработке математических моделей следует придерживаться гипотезы о сплошности деформируемой среды, отвечающей условию пластичности Губера–Мизеса, и опираться на математический опыт термодинамики нестационарных процессов [1–3].

Для теоретического исследования процесса СГВ биметаллических полуфабрикатов инструмента используются модели динамического взаимодействия системы «пуансон – деформируемая заготовка».

В качестве теоретического решения таких задач удобно использовать приближенный энергетический метод (метод верхней оценки),

основанный на использовании кинематически возможного поля скоростей, преобразованного из действительного непрерывного поля линий скольжения путем линейной аппроксимации. Данный метод позволяет совместно использовать аналитические и графические способы решения, а точность результатов определяется расхождением механических характеристик материалов и условий трения [1–3].

Помимо теоретического исследования напряженно-деформируемого состояния при СГВ методом верхней оценки решается основная технологическая задача по определению энергосиловых параметров процесса.

Обобщенная физико-математическая модель основывается на составлении уравнения баланса мощностей внутренних и внешних сил [1–3]

$$W_{\text{п}} = W_{\text{с.с}} = W_{\text{соб}} + W_{\text{дин}} \pm W_{\text{ин}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{п}}$ – мощность деформирующего пуансона; $W_{\text{с.с}}$ – суммарная мощность сил сопротивления; $W_{\text{соб}}$ – мощность сил собственного сопротивления металла деформированию; $W_{\text{дин}}$ – то же от действия динамических напряжений на поверхностях разрыва скоростей; $W_{\text{ин}}$ – то же локальных сил инерции движущейся заготовки.

В выражении (1) мощность $W_{\text{ин}}$ является знакопеременной величиной, так как процесс выдавливания разделяется на стадии разгона и торможения.

Стадии разгона преимущественно соответствуют запрессовка в матричную полость заготовки и выдавливание элементов полуфабриката с наименьшими степенями деформации, а стадии торможения – выдавливание элементов с большими степенями деформации.

Таким образом, на стадии разгона локальные силы инерции направлены в сторону, противоположную ходу движения пуансона, так как мощность $W_{\text{п}}$ затрачивается на преодоление внутренних сил сопротивления деформированию материала и переход из упруго-пластической области в пластическую. Поэтому стадия разгона характеризуется тем, что величина мощности $W_{\text{ин}}$ в уравнении (1) берется со знаком плюс.

Переход от стадии разгона к стадии торможения происходит одномоментно и характеризуется максимальным усилием на пуансоне. Локальные силы инерции меняют свое направление на противоположное и действуют по ходу движения пуансона. Отмеченное «вспомогательное» действие сил инерции деформируемой заготовки приводит к уменьшению нагрузки на пуансон и снижению его мощности $W_{\text{п}}$. Учитывая сказанное, на стадии торможения составляющая мощности внутренних сил $W_{\text{ин}}$ берется в (1) со знаком минус [1–3].

Учитывая вышеописанное, для разработки физико-математических моделей различных технологических процессов СГВ следует опираться на физическо-механические свойства обрабатываемых материалов, геометрические параметры для определения количества деформированного материала и определения зависимости предела текучести от параметров нагружения.

Для получения качественного и прочного биметаллического соединения основы и рабочей части полуфабриката требуется получение совместных металлических связей путем деформационного воздействия на соединяемые материалы в зоне контакта, которое достигается при СГВ путем совместного пластического течения. Металлические связи по своей сути не относятся к химическим связям, и понятие металлической связи можно считать качественным, так как металлы обычно не имеют молекулярного строения, а их атомы соединяются в кристаллические образования. Носителем свойств вещества в этом случае является не молекула, а фаза. Кроме того, поверхности твердых тел насыщены связью с атомами окружающей среды, т. е. имеют окисные и иные пленки (рис. 1) [4].

Непосредственно над ювенильной (физически и химически чистой) поверхностью металла обычно находится слой его оксидов, имеющий толщину нескольких ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$).

При наплавке рабочего слоя наличие адсорбционных слоев не оказывает значительного влияния на прочность соединения, так как они в процессе протекающих металлургических реакций переходят в шлак и частично смешиваются с металлом основной части.

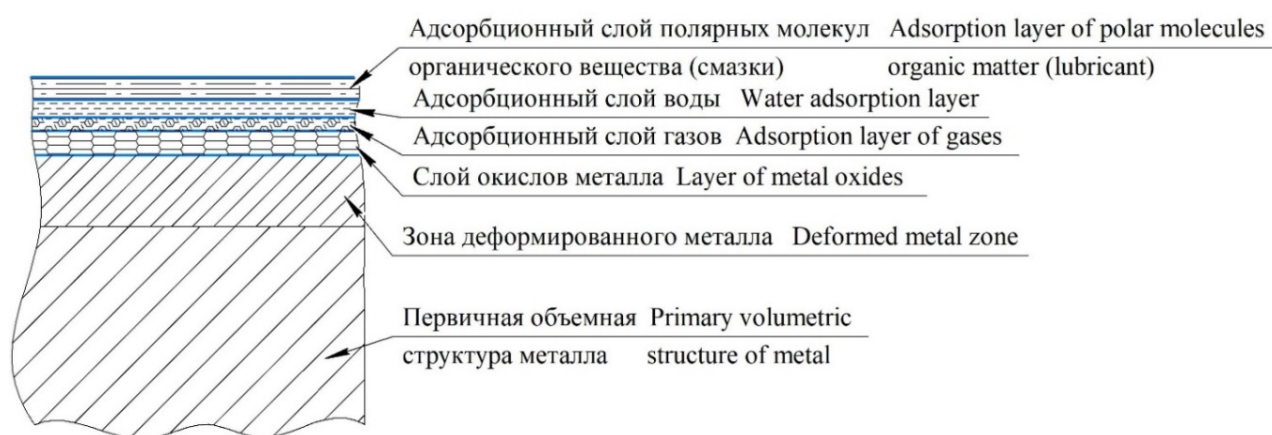


Рис. 1. Расположение основных адсорбционных слоев на поверхности технического металла

Fig. 1. Location of the main adsorption layers on the surface of technical metal

При деформационном соединении (до или в процессе) их удаление или значительное дробление до смешивания с соединяемыми металлами является одним из главных условий для развития нормальных химических связей в зоне контакта кристаллических решеток соединяемых материалов.

Решение данной проблемы является важным аспектом при разработке геометрии составной заготовки, подготовке соединяемых поверхностей, защите от окисления в процессе нагрева заготовки технологических схем выдавливания.

Главным преимуществом деформационного соединения является отказ от припоев, флюсов и ограничений по соотношению толщин соединяемых частей разнообразных металлических материалов.

Лабораторные технологии скоростного горячего выдавливания

В Белорусском национальном техническом университете на базе научно-исследовательских лабораторий кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» и кафедры «Гидротехническое, энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» разработаны лабораторные технологии СГВ типовых биметаллических полуфабрикатов деталей штамповой оснастки с формообразующими полостями, стержневых деталей и тангенциальных резцов, применяемых для разрушения горных пород и снятия дорожного полотна. Данные техпроцессы отражают ос-

новные механизмы получения биметаллического соединения при различных схемах деформирования.

При разработке лабораторных технологий СГВ биметаллических полуфабрикатов в качестве деталей-представителей были выбраны вставка пуансона из номенклатуры инструментально-штампового производства для метизного цеха ОАО «МАЗ» (рис. 2а), прошивной пуансон из номенклатуры инструментального производства ОАО «МАЗ» для кузнечного цеха (рис. 2б) и тангенциальный резец фирмы Wirtgen W6/20 (рис. 2с).

Отработка лабораторных технологий СГВ проводилась на горизонтальной установке с использованием разъемных конических полуматриц 1, которые за счет своей конической формы фиксировались в штампе 2 (рис. 3).

Штамп состоит из обоймы 3, которая имеет ответную коническую поверхность полуматриц 1. Для увеличения прочности обоймы 3 она усилена бандажами 4 и 5, причем бандаж 5 имеет фланец для крепления к плите 6 штампа 2 прижимным кольцом 7 и далее к шаботной плите 8 горизонтальной установки посредством болтов 9. Также в штампе 2 предусмотрен торцовый упор 10, предохраняющий плиту 6 от смятия. В нижней плите 6 и шаботной плите 8 предусмотрено отверстие для выталкивателя при извлечении полуматриц 1. Для передачи деформирующего усилия служит промежуточный пуансон 11 посредством ударника 12, разгоняемого до требуемой начальной скорости v_0 в стволе горизонтальной установки.

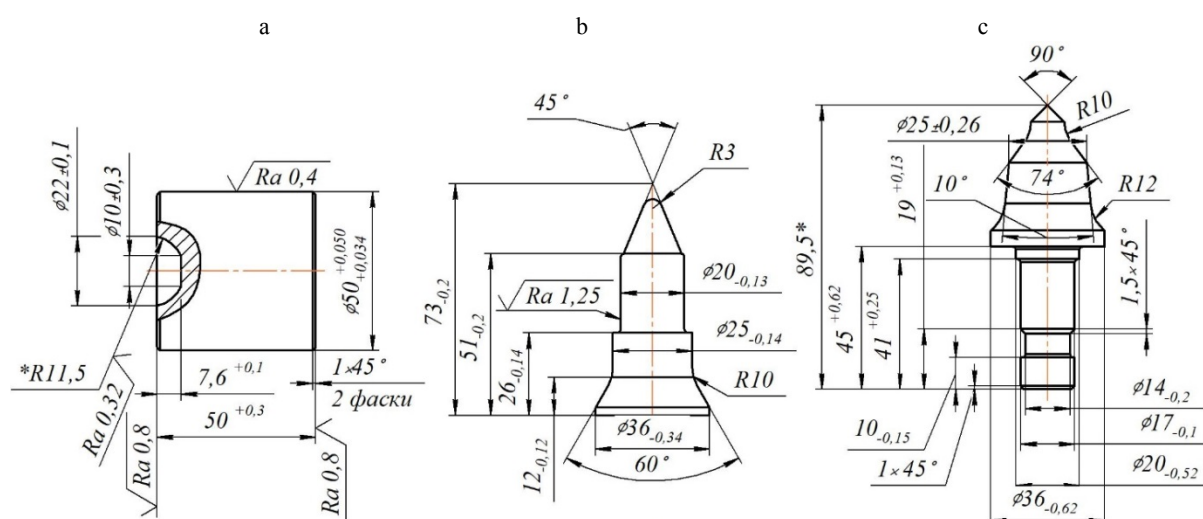


Рис. 2. Детали-представители: а – вставка пуансона; б – прошивной пуансон; с – тангенциальный резец

Fig. 2. Representative products: a – punch insert; b – piercing punch; c – tangential pick

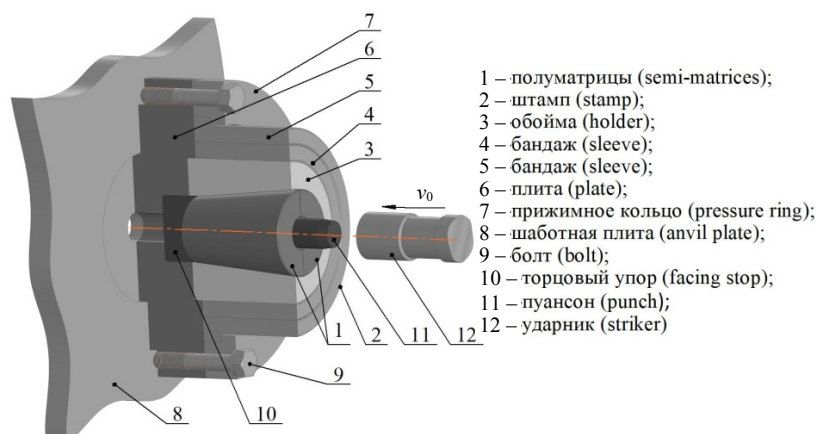


Рис. 3. Штамп для скоростного горячего выдавливания

Fig. 3. Stamp for high-speed hot extrusion

Описание устройства горизонтальной установки и внешний вид штамповой оснастки подробно приведены в работах [5, 6].

При разработке геометрии составных заготовок использовали экспериментальные исследования на свинцовых образцах методом координатной сетки, чтобы определить зоны интенсивного пластического течения, потому что качественное биметаллическое соединение образуется при совместном пластическом течении на границе раздела двух материалов. Уточнение размеров и формы частей составных заготовок производили при помощи компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM-3D.

Детальные вычислительные экспериментальные исследования при помощи компью-

терного моделирования представлены в работах [7–10].

Составные заготовки изготавливались резанием на токарном станке из прутков одной поставки. Контактные поверхности подвергались зачистке наждачной бумагой и протирке этиловым спиртом. Составные части заготовки соединялись путем запрессовки с натягом.

Нагрев составных заготовок осуществляли в тигле с порошкообразным древесным углем для защиты от образования окалины и обезуглероживания поверхностного слоя сталей. В качестве нагревательного устройства использовали электрическую камерную печь СНОЛ-2УМ. Время нагрева выбирали, исходя из равномерного нагрева составной заготовки

по всему объему (1 мин на 1 мм диаметра заготовки). Рабочая температура контролировалась с помощью платино-родиевой термопары ТПРТ 01.01-000-ВЗ-Н-К799-4-320, соединенной с микропроцессорным измерителем-регулятором ТРМ-101. Она составляла $T_{пл} = 1200^\circ\text{C}$, соответственно с учетом подствывания заготовки при переносе в штамп температура начала деформирования составляла $T_d = 1150^\circ\text{C}$ [5, 6].

Начальная скорость деформирования при скоростном горячем выдавливании фиксировалась с применением акустической методики, которая описана в работе [11].

Для получения биметаллических полуфабрикатов для детали «вставка пуансона» в качестве рабочей части составной заготовки использовали высоколегированную сталь Х12МФ, а в качестве материала основы – конструкционную сталь 40Х.

На рис. 4 показана схема деформирования для СГВ деталей «вставка пуансона».

Режим СГВ осуществлялся в диапазоне начальных скоростей деформирования $v_0 = 60\text{--}65\text{ м/с}$.

Полуматрицы 1 выполнялись с цилиндрическим сквозным отверстием по диаметру детали «вставка пуансона» с учетом припуска под последующую шлифовку. Кроме того, в полуматрицах выполнена кольцевая проточка 5, которая как минимум в 2 раза превышает исходную площадь поперечного сечения заготовки, а также газоотводящие каналы 7, которые с учетом схемы закрытой штамповки служат для удаления воздуха из зоны деформирования и соответственно снижения дефор-

мирующего усилия. Формообразующий пуансон 2 изготавливался по скользящей посадке относительно отверстия полуматриц 1, а часть пуансона для формообразования полости выполнялась по размерам полости согласно чертежу (рис. 2 а). Подпор 4 служит для установки составной заготовки 3 в положение, обеспечивающее совместное затекание частей заготовки в кольцевую проточку 5 при формообразовании биметаллического полуфабриката 6.

Процесс СГВ осуществляется в такой последовательности. После сборки штампа нагретая до $T_d = 1150^\circ\text{C}$ составная заготовка 3 загружается в матричную полость полуматриц 1, затем помещается в матричную полость формообразующий пуансон 2, которому ударником (рис. 3, поз. 12), разогнанным в стволе горизонтальной установки (на рисунках не показана) до скорости $v_0 = 60\text{--}65\text{ м/с}$, сообщается энергия, обеспечивающая высокоскоростную деформацию составной заготовки 3.

Стадия разгона при высокоскоростной деформации сопровождается выдавливанием формообразующей полости в верхней части составной заготовки и распрессовкой составной заготовки 3 в матричной полости до начала затекания в кольцевую проточку 5. Далее следует стадия торможения, которой соответствует радиальное совместное пластическое течение объемов металла на поверхностях контакта двух частей составной заготовки 3 в кольцевую проточку 5, в результате чего формируется биметаллическое соединение между двумя частями заготовки с формообразованием биметаллического полуфабриката 6 [1, 5].

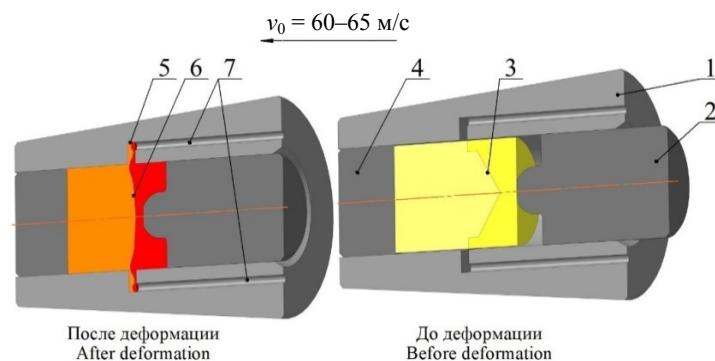


Рис. 4. Схема деформирования для скоростного горячего выдавливания биметаллических полуфабрикатов детали «вставка пуансона»: 1 – полуматрица; 2 – формообразующий пуансон; 3 – составная заготовка; 4 – подпор; 5 – кольцевая проточка; 6 – биметаллический полуфабрикат; 7 – газоотводящие каналы

Fig. 4. Deformation scheme for high-speed hot extrusion of bimetallic semi-finished products of the “tangential pick” part: 1 – semi-matrix; 2 – forming punch; 3 – composite billet; 4 – support; 5 – ring groove; 6 – bimetallic semi-finished product; 7 – exhaust gas channels

Для получения биметаллических полуфабрикатов для детали «прошивной пуансон» в качестве рабочей части составной заготовки использовали легированную сталь 5ХНМ, а в качестве материала основы – конструкционную сталь 40Х.

На рис. 5 показана схема деформирования для СГВ деталей «прошивной пуансон».

Режим СГВ осуществлялся в диапазоне начальных скоростей деформирования $v_0 = 75\text{--}80$ м/с.

Полуматрицы 1 выполнялись с цилиндрической приемной частью по диаметру составной заготовки 3 и формообразующей матричной полостью согласно чертежу (рис. 2б) с учетом припусков под шлифовку. Также в донной части выполнен газоотводящий канал 5 для удаления воздуха из зоны деформирования. Мастер-пуансон 2 изготавливался по скользящей посадке относительно приемного отверстия полуматриц 1.

Процесс СГВ осуществляется в такой последовательности. После сборки штампа нагретая до $T_d = 1150$ °С составная заготовка 3 загружается в приемное отверстие полуматриц 1, а затем мастер-пуансон 2, которому ударником (рис. 3, поз. 12), разогнанным в стволе горизонтальной установки (на рисунках не показана) до скорости $v_0 = 75\text{--}80$ м/с, сообщается энергия, обеспечивающая высокоскоростную деформацию составной заготовки 3.

Стадия разгона при высокоскоростной деформации сопровождается распрессовкой составной заготовки 3 в приемном отверстии полуматриц 1 и выдавливанием конического участка биметаллического полуфабриката 4.

Далее следует стадия торможения, которой соответствует прямое совместное пластическое течение объемов металла на поверхностях контакта двух частей составной заготовки 3 до заполнения оставшегося объема матричной полости, в результате чего формируется биметаллическое соединение между двумя частями заготовки с формообразованием биметаллического полуфабриката 4 [2, 6].

Для получения биметаллических полуфабрикатов для детали «тангенциальный резец» в качестве рабочей части составной заготовки использовали легированную сталь ШХ 15, а в качестве материала основы – конструкционную сталь 65Г.

На рис. 6 показана схема деформирования для СГВ деталей «тангенциальный резец».

Режим СГВ осуществлялся в диапазоне начальных скоростей деформирования $v_0 = 85\text{--}90$ м/с.

Полуматрицы 1 выполнялись с цилиндрической приемной частью по диаметру составной заготовки 3 и формообразующей матричной полостью согласно чертежу (рис. 2с) с учетом припусков под шлифовку. Также в донной части выполнен газоотводящий канал 5 для удаления воздуха из зоны деформирования. Формообразующий пуансон 2 изготавливался по скользящей посадке относительно приемного отверстия полуматриц 1 с внутренним отверстием под формообразование хвостовика детали «тангенциальный резец» согласно чертежу (рис. 2с) с учетом припусков под шлифовку, также выполнен газоотводящий канал 6 для удаления воздуха из зоны деформирования.

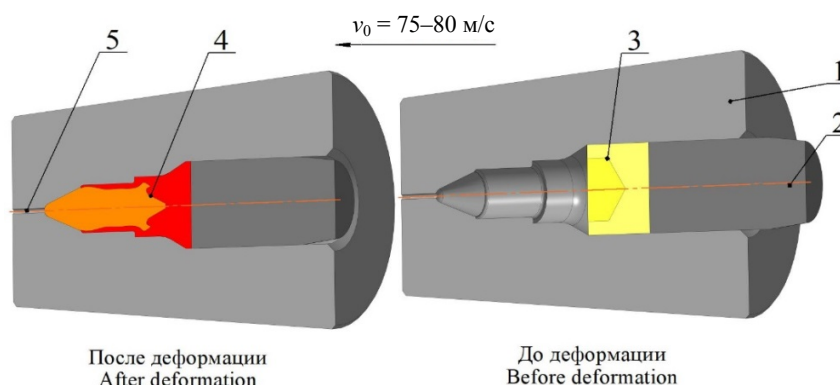


Рис. 5. Схема деформирования для скоростного горячего выдавливания биметаллических полуфабрикатов детали «прошивной пуансон»: 1 – полуматрица; 2 – мастер-пуансон; 3 – составная заготовка; 4 – биметаллический полуфабрикат; 5 – газоотводящий канал

Fig. 5. Deformation scheme for high-speed hot extrusion of bimetallic semi-finished products of the “piercing punch” part: 1 – semi-matrix; 2 – master-punch; 3 – composite billet; 4 – bimetallic semi-finished product; 5 – exhaust gas channel

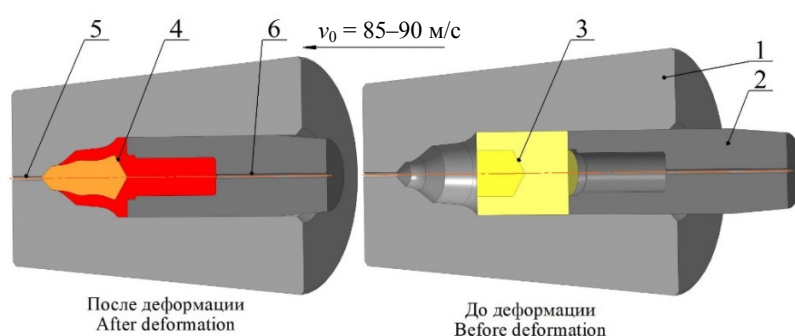


Рис. 6. Схема деформирования для скоростного горячего выдавливания биметаллических полуфабрикатов детали «тангенциальный резец»: 1 – полуматрица; 2 – формообразующий пуансон; 3 – составная заготовка; 4 – биметаллический полуфабрикат; 5, 6 – газоотводящие каналы

Fig. 6. Deformation scheme for high-speed hot extrusion of bimetallic semi-finished products of the “tangential pick” part: 1 – semi-matrix; 2 – forming punch; 3 – composite billet; 4 – bimetallic semi-finished product; 5, 6 – exhaust gas channels

Процесс СГВ осуществляется в такой последовательности. После сборки штампа нагретая до $T_d = 1150^\circ\text{C}$ составная заготовка 3 загружается в приемное отверстие полуматрицы 1, а затем формообразующий пуансон 2, которому ударником (рис. 3, поз. 12), разогнанным в стволе горизонтальной установки (на рисунках не показана) до скорости $v_0 = 85\text{--}90\text{ м/с}$, сообщается энергия, обеспечивающая высокоскоростную деформацию составной заготовки 3.

Стадия разгона при высокоскоростной деформации сопровождается распрессовкой составной заготовки 3 в приемном отверстии полуматрицы 1 и прямым выдавливанием в матричную полость при совместном пластическом течении объемов металла на поверхностях контакта двух частей составной заготовки 3 с формированием биметаллического соединения и началом затекания в отверстие формообразующего пуансона 2. Далее следует стадия торможения, которой соответствует обратное выдавливание хвостовой части биметаллического полуфабриката 4 и окончательное его формообразование [3, 12].

На рис. 7 представлены фото шлифов поковок и обработанных деталей-представителей.

Исследования микроструктуры и микротвердости

Для качественной оценки полученного соединения биметаллических полуфабрикатов и структурно-фазовых превращений в процессе высокоскоростного воздействия полученные шлифы поковок исследовались путем анализа их микроструктуры и микротвердости.

Качество соединения компонентов биметаллических полуфабрикатов определяется зоной соединения, которая включает в себя как поверхность контакта, так и прилегающие к ней области соединяемых сталей.

Анализ микроструктуры проводили с применением металлографического микроскопа «Альтами» MET 1M.

На рис. 8 представлены микроструктуры зоны соединения биметаллических полуфабрикатов.



Рис. 7. Детали-представители и их шлифы: а – вставка пуансона; б – прошивной пуансон; с – тангенциальный резец

Fig. 7. Representative products and their sections: а – punch insert; б – piercing punch; с – tangential pick

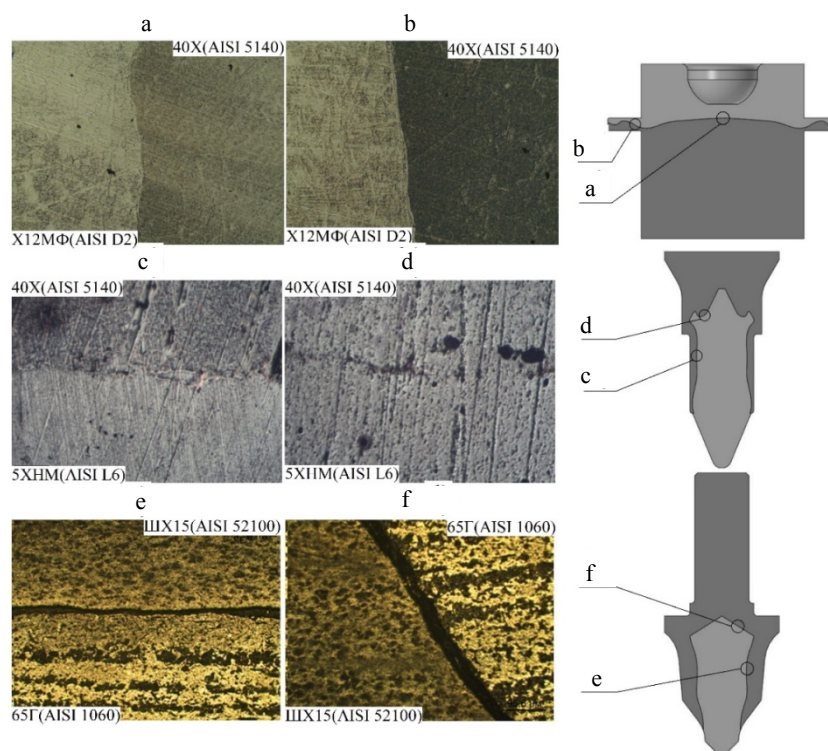


Рис. 8. Микроструктура в зоне биметаллического соединения полуфабрикатов деталей-представителей ($\times 400$):
а, б – вставка пуансона; с, д – прошивной пуансон; е, ф – тангенциальный резец

Fig. 8. Microstructure in the zone of bimetallic connection of semi-finished products of representative parts ($\times 400$):
а, б – punch insert; с, д – piercing punch; е, ф – tangential pick

Проведенные экспериментальные исследования при разработке лабораторных технологий СГВ показали, что степень наличия неметаллических включений на границе раздела компонентов биметаллических полуфабрикатов зависит от степени и температуры горячей пластической деформации, а также схемы деформирования. Кроме того, установлено, что, несмотря на кратковременность протекающих деформационных процессов, в зоне соединения развивается диффузионное взаимодействие с образованием сплава, отличного от обеих сталей. Данное явление, очевидно, объясняется установлением полного физического контакта с развитием нормальных химических связей на границе раздела при совместном пластическом течении, сопровождающемся разрушением окисных пленок с обнажением ювенильных поверхностей и выраженным тепловым эффектом благодаря адиабатному протеканию процесса за счет высоких скоростей деформирования, а также режиму закрытой штамповки, который обеспечивает схему неравномер-

ного всестороннего сжатия на стадии торможения.

Так, соединение, полученное при выдавливании биметаллического полуфабриката детали «вставка пуансона», имеет выделяющуюся светлую границу раздела, которая практически не содержит неметаллических включений по всей зоне соединения (рис. 8а, б), так как разрушенные оксидные пленки раздроблены и вынесены в кольцевую проточку 5 (рис. 4). Коэффициент вытяжки при радиальном выдавливании в кольцевую проточку составлял $\lambda = 3,125$. Наличие светлой границы раздела объясняется значительной диффузией хрома от стали X12MF к стали 40X с образованием карбидов хрома в зоне соединения.

При выдавливании биметаллического полуфабриката детали «прошивной пуансон» зона соединения не имеет ярко выраженной границы раздела, так как соединяемые стали 40X и 5XHM имеют близкий химический состав по содержанию углерода и низкий процент легирующих элементов (рис. 8с, д). Граница раздела (рис. 8с) имеет незначительное

количество неметаллических включений, но в основном они измельчены, растворены и равномерно распределены в зоне соединения за счет значительных степеней деформации при совместном пластическом течении (коэффициент вытяжки $\lambda = 3,24$). На границе раздела соединения в торцевой части (рис. 8d) наблюдаются конгломераты неметаллических включений, так как здесь при деформации формируется застойная зона и неметаллические включения не имеют возможности дробиться.

При выдавливании биметаллического полуфабриката детали «тангенциальный резец» зона соединения имеет резко выраженную темную границу раздела, что, очевидно, связано с активной взаимной диффузией углерода сталей ШХ 15 и 65Г с образованием карбидной ликвации в зоне соединения (рис. 8е, ф), а также наличием некоторого количества неметаллических включений вследствие того, что зона соединения (рис. 8е) в сравнении с двумя предыдущими полуфабрикатами имеет более широкую границу раздела, что объясняется меньшими степенями деформации при совместном пластическом течении (коэффициент вытяжки $\lambda = 2,0$). На границе раздела в торцевой части (рис. 8f) помимо застойной зоны при прямом выдавливании также действуют растягивающие напряжения при формообразовании хвостовика обратным выдавливанием, поэтому здесь не формируется качественное биметаллическое соединение. В связи с этим размеры рабочей вставки составной заготовки путем компьютерного моделирования в DEFORM-3D подбирались так, чтобы при совместном пластическом течении получить конусообразную

сопрягаемую поверхность, которая дополнительно формирует «замковое» соединение между рабочей вставкой и основной биметаллического полуфабриката (рис. 6, поз. 4).

Измерение микротвердости в зоне соединения и прилегающих к ней слоев разнородных сталей (рис. 8а, с, е) производили на цифровом микротвердомере AFFRI MVDМ8 с нагрузкой $P = 0,981 \text{ Н}$ (100 г) в соответствии с ГОСТ 9450–76. Погрешность измерений согласно паспортным данным прибора не превышает 3 %.

На рис. 9 представлены графики распределения микротвердости в зоне биметаллического соединения (рис. 8а, с, е).

Все три образца имеют общую характерную зависимость распределения микротвердости в зоне соединения, которая свидетельствуют о том, что диффузия углерода интенсивнее протекает от менее легированной к более легированной стали. Так, в окрестностях границы раздела сталей порядка 200 мкм со стороны рабочей вставки наблюдается зона повышенной твердости, а со стороны основы – зона обезуглероживания (рис. 9). Данное явление объясняется тем, что легирующие элементы под воздействием высокой температуры деформации (1100–1200 °С) являются более карбидообразующими элементами, чем железо, и поэтому диффузия углерода в биметаллических образцах происходит против градиента его концентрации в стали 40Х против сталей Х12МФ и 5ХНМ, а в случае композиции 65Г и ШХ15 определяющим является легирование хромом, который является более активным карбидообразующим элементом в сравнении с марганцем.

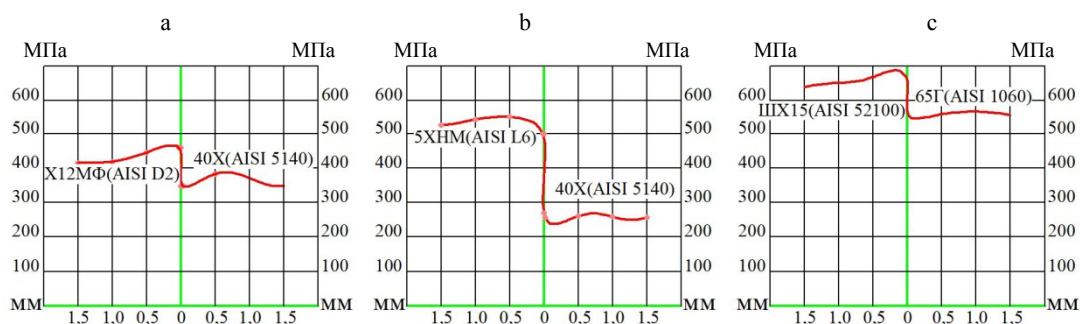


Рис. 9. Микротвердость в зоне биметаллического соединения полуфабрикатов деталей-представителей:
а – вставка пуансона; б – прошивной пуансон; с – тангенциальный резец

Fig. 9. Microhardness in the zone of bimetallurgical connection of semi-finished products of representative parts:
а – punch insert; б – piercing punch; с – tangential pick

Обезуглероженная зона сталей 40X и 65Г, образующаяся в результате миграции углерода, имеет различную микротвердость, что выражается в некотором повышении микротвердости по мере удаления от границы раздела с последующим выравниванием ее значений. Очевидно, это является следствием упрочнения в зоне наиболее интенсивного пластического течения, вызывающего дополнительное повышение плотности дислокаций на границах зерен и субзерен в результате двойникования. Аналогично изменяется и микротвердость сталей X12МФ, 5ХНМ и ШХ15 в зоне, прилегающей к границе раздела.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны лабораторные технологии получения биметаллических полуфабрикатов для деталей-представителей «вставка пуансона» с композицией сталей 40X + X12МФ, «прошивной пуансон» с композицией 40X + 5ХНМ и «тангенциальный резец» с композицией 65Г + ШХ15.

2. В результате экспериментальных исследований установлена возможность формирования биметаллического соединения при скоростном выдавливании в диапазоне начальных скоростей деформирования в $v_0 = 60\text{--}90$ м/с и температуре деформирования составной заготовки $T_d = 1150$ °С при различных степенях деформации $\lambda = 2\text{--}3,24$.

3. Исследования микроструктуры и сопоставление степени загрязненности неметаллическими включениями вдоль границы раздела компонентов биметаллических образцов, полученных при различных степенях и температурах скоростного горячего выдавливания в зоне соединения, показали, что с повышением степени деформации и температуры в зоне соединения благодаря тепловому эффекту включения в горячей зоне измельчаются и перераспределяются практически до полного растворения в металлической матрице.

4. Исследования микротвердости в зоне соединения позволили установить общую характерную зависимость, свидетельствующую о протекающих диффузионных процессах с перераспределением концентрации углерода и легирующих элементов в окрестности границы раздела разнородных сталей и увеличением плотности дислокаций в результате двойникования при скоростном деформировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудин, М. В. Анализ процесса скоростного ударного выдавливания полостей формообразующих деталей штамповой оснастки / М. В. Кудин, И. В. Качанов, С. А. Ленкевич // *Металлургия: респ. межведом. сб. науч. тр.: в 2 ч. / редкол.: В. И. Тимошпольский (гл. ред) [и др.]*. Минск: БНТУ, 2013. Вып. 34, ч. 1. С. 201–209.
2. Качанов, И. В. Оптимизация режима нагружения при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий / И. В. Качанов, В. В. Власов // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук*. 2018. Т. 63, № 1. С. 43–52. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-43-52>.
3. Быков, К. Ю. Силовой режим скоростного комбинированного выдавливания плоских биметаллических дорожных резцов / К. Ю. Быков, И. В. Качанов, И. М. Шаталов // *Наука и техника*. 2021. № 4. С. 287–295. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>.
4. Сварочные процессы и оборудование: учеб. пособие / В. А. Ленивкин, Д. В. Кисилев, В. А. Софьяников, А. И. Никашин. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2015. 178 с.
5. Качанов, И. В. Ресурсосберегающая технология получения биметаллических формообразующих деталей «вставка пуансона» скоростным горячим выдавливанием / И. В. Качанов, М. В. Кудин, С. А. Ленкевич // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. / Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки*. С. 160–169.
6. Качанов, И. В. Ресурсосберегающая технология скоростного горячего выдавливания биметаллического стержневого инструмента / И. В. Качанов, В. Н. Шарий, В. В. Власов // *Наука и техника*. 2016. № 1. С. 3–8.
7. Компьютерное моделирование ресурсосберегающей технологии скоростного горячего выдавливания биметаллического инструмента / И. В. Качанов, В. В. Власов, С. А. Ленкевич, А. А. Рубчя // *Тенденции интеграции образования, науки и бизнеса: сб. материалов Белорусско-Литовской биржи деловых контактов*, 27–28 нояб. 2014 г. Минск: БНТУ, 2014. С. 61–63.
8. Качанов, И. В. Компьютерное моделирование в Deform-3D для анализа пластического течения при скоростном горячем выдавливании биметаллических формообразующих деталей штамповой оснастки / И. В. Качанов, М. В. Кудин, С. А. Ленкевич // *Наука и техника*. 2015. № 1. С. 20–25.
9. Качанов, И. В. Моделирование процесса скоростного выдавливания биметаллических резцов для дорожных машин в среде программы DEFORM-3D / И. В. Качанов, И. М. Шаталов, А. А. Рубчя // *Наука и техника*. 2018. № 3. С. 198–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-198-203>.
10. Быков, К. Ю. Влияние размеров исходной металлической вставки на геометрические параметры биметаллического соединения при выдавливании дорожных резцов / К. Ю. Быков, И. В. Качанов, С. А. Ленкевич //

Теоретическая и прикладная механика: междунауч.-техн. сб. Минск: БНТУ, 2022. Вып. 37. С. 144–152.

11. Акустическая методика регистрации начальной скорости деформирования при высокоскоростной штамповке стержневых изделий / К. Ю. Быков, И. В. Качанов, С. А. Ленкевич, В. В. Власов // Наука и техника. 2023. № 1. С. 20–26. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-20-26>.
12. Влияние начальной скорости деформирования на качество биметаллических резцов, полученных скоростным комбинированным выдавливанием / К. Ю. Быков, И. В. Качанов, С. А. Ленкевич, И. М. Шаталов // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы XII Междунауч.-практ. конф. (Минск, 13 марта 2024 г.): в рамках выставки «Автоматизация, электроника – 2024» / редкол.: А. Р. Околов (гл. ред.) [и др.]; сост. А. Н. Дербан. Минск: БНТУ, 2024. С. 29–30. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/142305>.

Поступила 11.01.2024

Подписана в печать 14.03.2024

Опубликована онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. Kudin M. V., Kachanov I. V., Lenkevich S. A. (2013) Analysis of the Process of High-Speed Impact Extrusion of Cavities of Forming Parts of Stamping Equipment. *Metallurgiya: resp. mezhvedom. sb. nauch. tr.* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, Iss. 34, Part 1, 201–209 (in Russian).
2. Kachanov I. V., Vlasov V. V. (2018) Loading Regime Optimization for High-Speed Impact Extrusion of Bimetallic Flat-Step Rod Products. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 63 (1), 43–52. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-43-52> (in Russian).
3. Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Shatalov I. M. (2021) Power Mode of High-Speed Combined Extrusion of Flat Bimetallic Road Milling Picks. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 20 (4), 287–295 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-287-295>.
4. Lenivkin V. A., Kisilev D. V., Sofyanikov V. A., Nikashin A. I. (2015) *Welding Processes and Equipment*. Rostov on Don, Publishing Center of Don State Technical University. 178 (in Russian).
5. Kachanov I. V., Kudin M. V., Lenkevich S. A. (2014) Resource-Saving Technology for Producing Bimetallic Forming Parts “Punch Insertion” by High-Speed Hot Extrusion. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauch. tr. Kn. 2: Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki* [Modern Methods and Technologies for the Creation and Processing of Materials: Collection of Scientific Papers. Book 2: Technologies and Equipment for Mechanical and Physical-Technical Processing]. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 160–169 (in Russian).
6. Kachanov I. V., Shary V. N., Vlasov V. V. (2016) Resource-Saving Technology for High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Rod Parts. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*. 15 (1), 3–8 (in Russian).
7. Kachanov I. V., Vlasov V. V., Lenkevich S. A., Rubchenya A. A. (2014) Computer Modeling of Resource-Saving Technology of High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Tool. *Tendentsii integratsii obrazovaniya, nauki i biznesa: sb. materialov Belorussko-Litovskoi birzhi delovykh kontaktov, 27–28 noyab. 2014 g.* [Trends in the Integration of Education, Science and Business: Collection of Materials of the Belarusian-Lithuanian Business Contacts Exchange, November 27–28, 2014]. Minsk, Belarusian National Technical University, 61–63 (in Russian).
8. Kachanov I. V., Kudin M. V., Lenkevich S. A. (2015) Computer Modeling in Deform-3D for Analysis of Plastic Flow in High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Formative Parts of Die Tooling. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, (1), 20–25 (in Russian).
9. Kachanov I. V., Shatalov I. M., Roubchenya A. A. (2018) Modeling of High-Speed Extrusion Process for Bimetal Milling Picks of Road Milling Machines in Deform-3D Software Environment. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 17 (3), 198–203. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-198-203> (in Russian).
10. Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Lenkevich S. A. (2022) The Influence of the Dimensions of the Initial Metal Insert on the Geometric Parameters of the Bimetallic Connection When Extruding Road Cutters. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhduunar. nauch.-tekh. sb.* [Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection]. Minsk, Belarusian National Technical University, Iss. 37, 144–152 (in Russian).
11. Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Lenkevich S. A., Vlasov V. V. (2023) Acoustic Method for Recording Initial Deformation Rate at High-Speed Forging of Rod Products. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 22 (1), 20–26. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-1-20-26> (in Russian).
12. Bykov K. Yu., Kachanov I. V., Lenkevich S. A., Shatalov I. M. (2024) The Influence of the Initial Deformation Rate on the Quality of Bimetallic Cutters Obtained by High-Speed Combined Extrusion. *Innovatsionnye tekhnologii, avtomatizatsiya i mekhatronika v mashino- i priborostroenii: materialy KhII mezhduunar. nauch.-prakt. konf. (Minsk, 13 marta 2024 g.)* [Innovative Technologies, Automation and Mechatronics in Mechanical Engineering and Instrument Making: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference (Minsk, March 13, 2024)]. Minsk, Belarusian National Technical University, 29–30. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/142305> (in Russian).

Received: 11.01.2024

Accepted: 14.03.2024

Published online: 31.05.2024