

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ИСХОДНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ВЫДАВЛИВАНИИ ДОРОЖНЫХ РЕЗЦОВ

Быков К. Ю., Качанов И. В., Ленкевич С. А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация. Показана возможность применения программного комплекса DEFORM-3D при исследованиях, направленных на изучение особенностей формирования биметаллического соединения при скоростном комбинированном выдавливании биметаллических дорожных резцов.

Проведено компьютерное моделирование процесса скоростного комбинированного выдавливания биметаллических дорожных резцов на предмет выявления влияния исходных размеров рабочей вставки на геометрические параметры биметаллического соединения.

По результатам моделирования с помощью программного комплекса DEFORM-3D установлены характерные особенности образования биметаллического соединения в процессе скоростного комбинированного выдавливания биметаллических дорожных резцов.

Введение. В настоящее время, для повышения эффективности различных видов научной, научно-технической и производственно-конструкторской деятельности широко используются системы автоматизированного проектирования (САПР). Среди этих систем особое место занимают средства инженерного анализа – САЕ-системы.

Важнейшим преимуществом использования САЕ-системы при исследовании и разработке новых технологических процессов является интенсификация внедрения этих процессов в производство.

Среди всех САЕ-системы особый интерес представляют системы симуляции и моделирования сложных технологических процессов, таких как обработка металлов давлением. Отличительной особенностью моделирования таких процессов является совместное решение задач, описывающих различные физические процессы – пластическое течение металла, теплопередачу, упрочнение и т. д.

Использование таких САЕ-системы становится особенно актуальным при разработке технологий изготовления биметаллического инструмента. Исследования совместного пластического течения двух металлов, еще на стадии разработки, позволяет установить степень их пластической деформации, выявить тенденции формирования биметаллического соединения в зависимости от исходных размеров составных частей заготовки. Все это позволяет в определенной степени спрогнозировать возможность получения качественного биметаллического соединения, от которого зависят эксплуатационные свойства получаемых изделий.

Цель исследований – с помощью компьютерного моделирования установить влияние различных исходных размеров рабочей вставки на геометрические параметры биметаллического соединения, полученного в результате совместного пластического течения двух металлов при скоростном комбинированном выдавливании биметаллических дорожных резцов.

Методика моделирования. Моделирование процесса скоростного комбинированного выдавливания биметаллических дорожных резцов проводилось в специализированном программном комплексе DEFORM-3D.

DEFORM-3D – система конечно-элементного моделирования, которая предназначена для анализа трехмерного течения металла при различных процессах обработки металла давлением [1, 2].

Для проведения исследований, используя размеры и форму составной заготовки, отштампованного биметаллического резца (рисунок 1), формообразующего пуансона и матрицы, была создана трехмерная компьютерная модель процесса скоростного комбинированного выдавливания биметаллических дорожных резцов (рисунок 2).

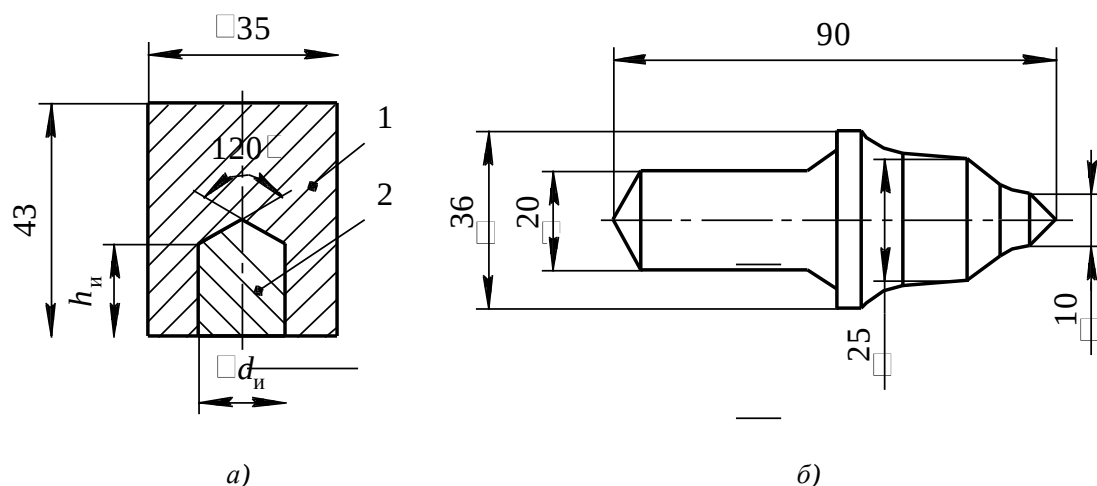


Рис. 1. Биметаллическая составная заготовка (а) и эскиз резца после штамповки (б): 1 – металлический корпус; 2 – рабочая вставка; d_u – исходный диаметр рабочей вставки; h_u – исходная высота рабочей вставки

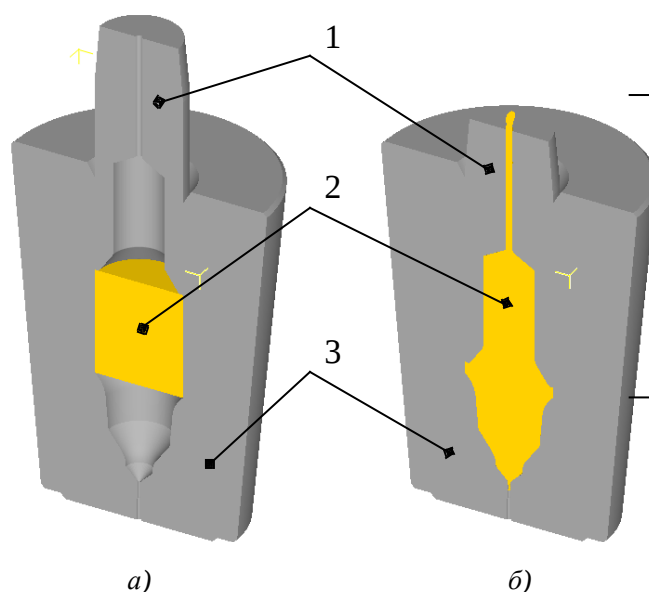


Рис. 2. Модели процесса скоростного комбинированного выдавливания биметаллических дорожных резцов до выдавливания (а) и после выдавливания (б): 1 – формообразующий пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица

Для имитации геометрии биметаллического соединения использовали встроенную функцию «Point Tracking» (Отслеживание Точки). Эта функция позволяет отслеживать смещение объема материала, заданного конечными точками фигуры.

Для получения исходной геометрии рабочей вставки создавался массив точек, расположенных в одной плоскости деформирования (осевой плоскости), которые повторяли форму и размеры исходной рабочей вставки.

Количество нанесенных точек варьировалось от 36 до 98 в зависимости от размеров рабочей вставки (рисунок 3). Исходная высота рабочей вставки $h_{и}$ варьировалась от 10 до 25 мм с шагом 1 мм. Исходный диаметр рабочей вставки $d_{и}$ также варьировался от 10 до 25 мм и так же с шагом 1 мм. Выбранные размеры исходной рабочей вставки обусловлены конструктивными особенностями дорожного резца (рисунок 1, б).

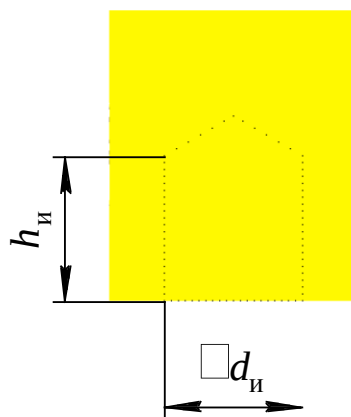


Рис. 3. Точки, нанесенные на осевую плоскость заготовки, имитирующие исходную форму и размеры рабочей вставки

Конусная часть на рабочей вставке выполняется для улучшения технологичности изготовления составной заготовки, таким образом, чтобы отверстие в металлическом корпусе можно было получать сверлением, а не точением.

Результаты моделирования. Разработанная модель является перспективным процессом получения биметаллического соединения в твердой фазе без специальной защиты от окисления по ряду разработанных технологических особенностей.

Основными механизмами пластической деформации являются скольжение и двойникование. Причем, в условиях традиционной обработки металлов давлением скольжение наиболее распространенный механизм, который достигается созданием нагрузки, обеспечивающей сдвиг атомов по кристаллографическим плоскостям. Механизм двойникования встречается реже и достигается за счет высоких скоростей деформирования. Также, при воздействии на деформируемое тело высоких температур механизм пластической деформации усложняется и к сдвиговому добавляется диффузионный [3–5].

В реальности, в зависимости от температурно-скоростных условий деформирования при получении биметаллических соединений на стадии объемного взаимодействия могут протекать различные процессы релаксационного характера: схватывание атомов контактных поверхностей; упорядоченность зоны соединения диффузионным путем и превращение ее в большеугловые межзеренные границы, ориентированные вдоль первоначальной плоскости контакта; миграция указанных межзеренных границ и образование в зоне соединения общих зерен; релаксация напряжений и др. Все указанные процессы взаимосвязаны в смысле влияния и на кинетику образования соединения. Однако два из них – схватывание атомов контактных поверхностей и миграция большеугловых межзеренных границ – являются основными, без развития которых не может быть получено соединение [3–5].

Учитывая все вышеперечисленное, рассмотрим технологические возможности получения качественного соединения на основе разработанной модели.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние для разработанной модели дорожного резца с получением биметаллического соединения при начальной скорости деформирования 20 м/с и температуры обработки 1150 °С.

Для исследования изменения характера формообразования биметаллического соединения используем показатель относительной степени деформации в диаметральных сечениях продеформированной рабочей вставки ε_i , определяемый выражением

$$\varepsilon_i = \frac{d_{\text{и}} - d_i}{d_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{и}}$ – исходный диаметр рабочей вставки; d_i – диаметр продеформированной рабочей вставки в характерных сечениях (рисунок 4).

Значения данного показателя в зависимости от хода деформирующего инструмента для различных исходных диаметров рабочей вставки $d_{\text{и}}$ представлены на графике (рисунок 4).

На первой стадии деформирования процесс пластического формоизменения рабочей вставки протекает в диапазоне хода инструмента $h_{\text{п}}$ от 0 до 15 мм и характеризуется минимальными значениями ε_i (рисунок 4). В данном диапазоне составная заготовка подвергается запрессовке по диаметру 36 мм (рисунок 1, б) с истечением металла в двух противоположных осевых направлениях. При этом образуются три зоны напряженно-деформированного состояния. Первая зона (рисунок 5, а) характеризуется действием сжимающих напряжений в процессе запрессовки. Вторая зона (рисунок 5, а) формируется в виде очага деформации направляющего течения металла в хвостовую часть штампуемого резца, а третья зона (рисунок 5, а) – в полость инструмента, формирующего корпус штампуемого резца, в которых происходит изменение знака напряжений, т. е. преобразованию сжимающих напряжений в растягивающие. При этом видно, что интенсивность деформации возрастает от большего исходного диаметра рабочей вставки ($d_{\text{и}} = 25$ мм) к меньшему ее диаметру ($d_{\text{и}} = 10$ мм). На графиках (рисунок 4) это выражается участком кривых с равномерным возрастанием показателя относительной степени деформации рабочей вставки ε_i . Геометрически это выражается в том, что рабочая вставка приобретает коническую форму (рисунок 6, а–ж).

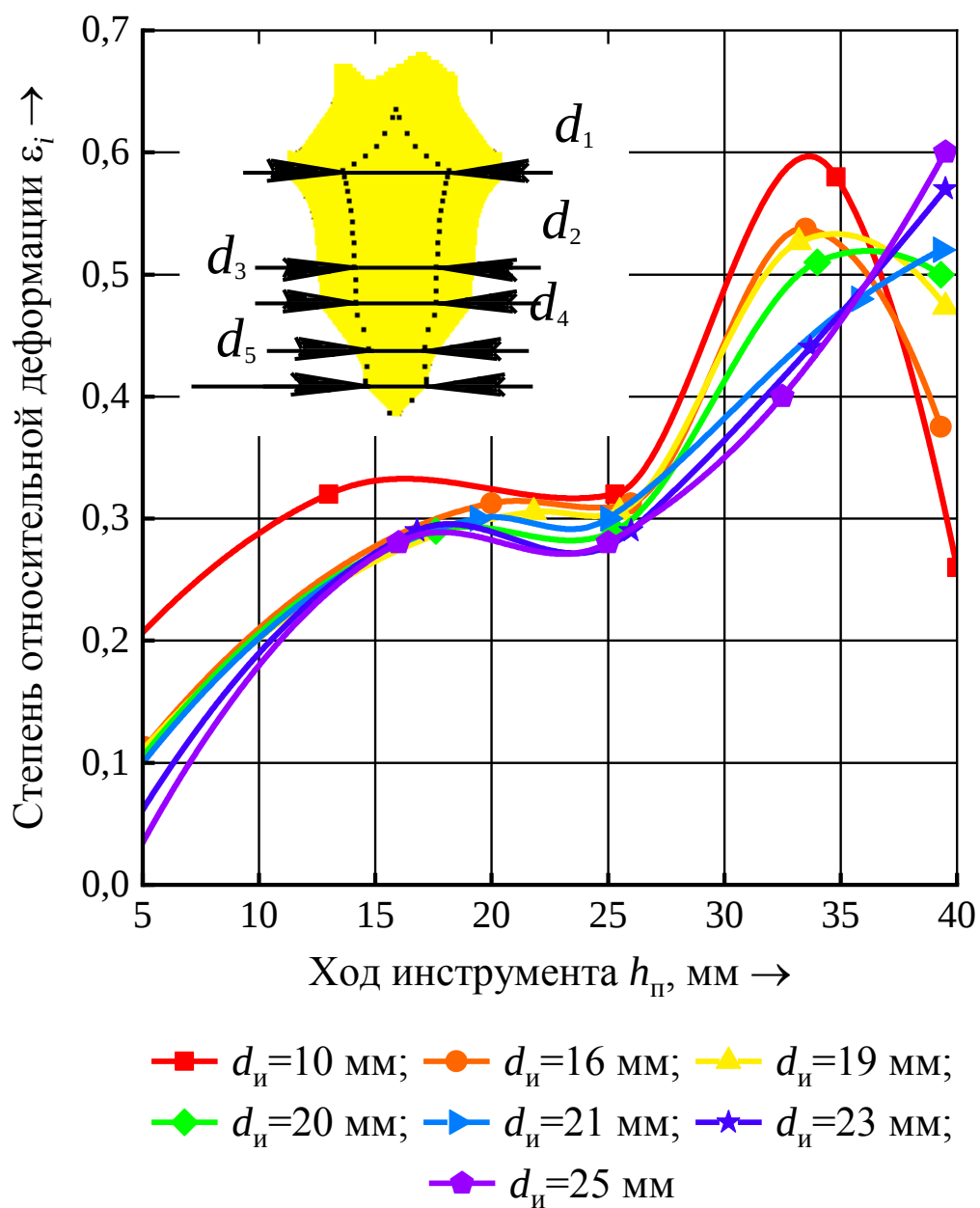


Рис. 4. Зависимость показателя относительной степени деформации рабочей вставки ε_i от хода инструмента h_n

Далее, по ходу деформирования (ход инструмента h_n от 15 до 27 мм), истечение металла происходит по цилиндрическим участкам инструмента в хвостовую часть резца по диаметру 20 мм и корпусную часть резца по диаметру 25 мм (рисунок 1, б).

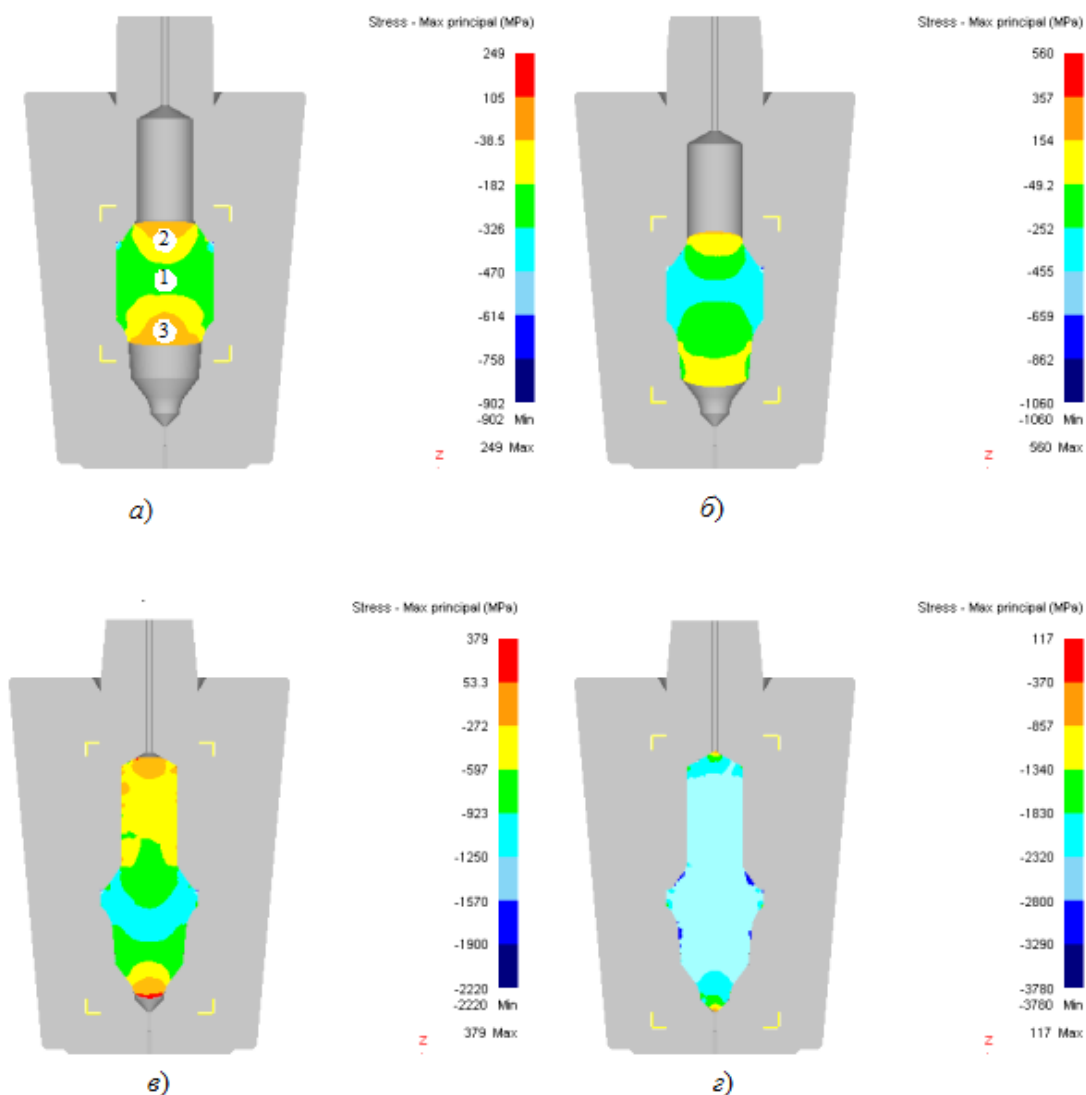


Рис. 5. Характер изменения напряженно-деформированного состояния при скоростном комбинированном выдавливании биметаллических дорожных резцов

Этот диапазон хода инструмента характеризуется установившемся напряженно-деформированным состоянием, при котором деформация протекает, в основном, в осевых направлениях и практически отсутствует в диаметральных сечениях (рисунок 5, б), что на кривых графика (рисунок 4) выражается в виде «плато» с постоянными значениями показателя относительной степени деформации рабочей вставки ε_i . Геометрически это выражается в том, что на деформируемой рабочей вставке формируется цилиндрический участок (рисунок 6). Причем, в диапазоне исходных диаметров рабочей вставки $d_{и}$ от 10 до 19 мм протяженность цилиндрического участка уменьшается и достигает своего минимального значения при исходном диаметре рабочей вставки равном 19 мм. Дальнейшее увеличение исходных диаметров рабочей вставки от 20 до 25 мм приводит к незначительному возрастанию протяженности цилиндрического участка. Также следует отметить, что наибольшая протяженность такого участка наблюдается у заготовок с рабочей вставкой с исходным диаметром $d_{и} = 10$ мм (рисунок 4, б).

При дальнейшем деформировании формообразуется наконечник резца и по достижении диаметра 10 мм (рисунок 1, б) в этом месте формируется застойная зона и ис-

течение металла в основном происходит в хвостовую часть резца до полного ее заполнения. На графике (рисунок 4) это диапазон движения инструмента от 25 до 35 мм. При этом в застойной зоне изменяется напряженно-деформированное состояние, при котором растягивающие напряжения начинают снижаться, а сжимающие резко возрастать (рисунок 5, в). При этом максимальные значения сжимающих напряжений действуют в наружных слоях металла постепенно снижаясь к центру заготовки. Таким образом при малых исходных диаметрах рабочей вставки d_n (до 20 мм) ее металл затекает в наконечник более интенсивно и в конце деформирования металла корпусной части резца под действием сжимающих напряжений в застойной зоне обжимает рабочую вставку в диаметральных сечениях застойной зоны образуя сужающуюся шейку, которая в экстремальных условиях работы дорожного резца будет являться концентратором напряжений, что может привести к его преждевременной поломке (рисунок 6, а–в). Наиболее ярко, с геометрической точки зрения, это выражается на заготовке с исходным диаметром рабочей вставки $d_n = 10$ мм (рисунок 6, а). На кривых графика это выражается в виде резкого скачкообразного изменения показателя относительной степени деформации ε_i в характерных диаметральных сечениях продеформированной рабочей вставки (рисунок 4).

Для исходных диаметров рабочей вставки d_n более 20 мм изменение относительной степени деформации ε_i происходит равномерно с постепенным увеличением, что геометрически выражается в отсутствии сужающейся шейки, в отличие от меньших исходных диаметров рабочей вставки, а наконечник в этом месте имеет коническую форму, заданную штамповым инструментом (рисунок 6, д–ж).

Окончание процесса деформирования (рисунок 5, з) характеризуется резким возрастанием сжимающих напряжений в 2–2,5 раза практически во всем объеме отштампованной заготовки.

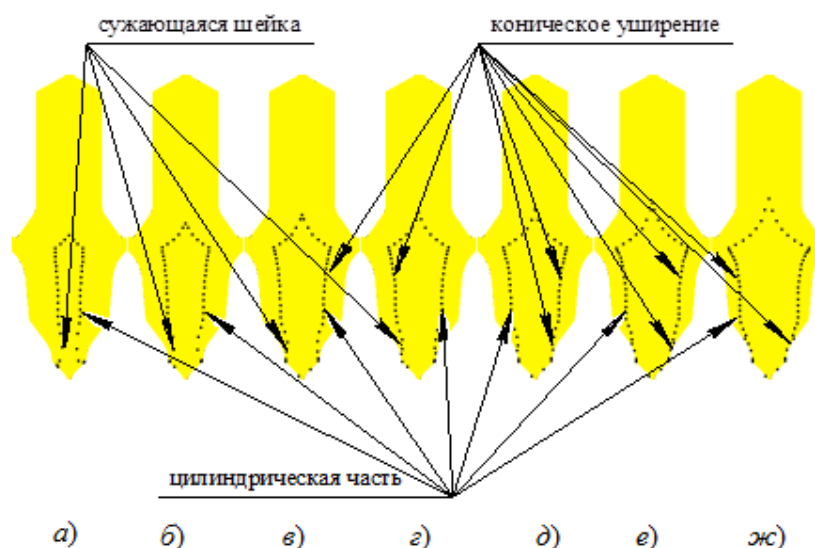


Рис. 6. Результат моделирования биметаллического дорожного резца с различными исходными диаметрами рабочей вставки d_n и исходной высотой $h_n = 18$ мм:

а – $d_n = 10$ мм; б – $d_n = 16$ мм; в – $d_n = 19$ мм; г – $d_n = 20$ мм; д – $d_n = 21$ мм; е – $d_n = 23$ мм;
ж – $d_n = 25$ мм

Помимо этого, ряд вычислительных экспериментов при компьютерном моделировании в DEFORM-3D показал, что высоту рабочей вставки h_n целесообразно выбирать в зависимости от диаметра заготовки с условием того, что после деформирования

основание конической вставки будет находиться в диаметральном сечении соответствующему диаметру 36 мм отштампованного резца (рисунок 1, б).

Рассматривая модель с точки зрения механизмов пластической деформации можно отметить, что, благодаря наличию конусных участков при формообразовании корпуса резца деформирование осуществляется путем сдвига с постоянным увеличением количества плоскостей скольжения путем последовательного перемещения дислокаций. Кроме того, очевидно, что высокая начальная скорость деформирования создает предпосылки для развития сдвиговых деформаций двойникования в результате чего повышается плотность дислокаций с возможностью выхода их на контактные поверхности совместно деформируемых металлов, что способствует их объемному взаимодействию с возможностью образования общих зерен. Также следует отметить, что процесс протекает при высокой температуре деформирования, а с учетом импульсного нагружения достигается высокая подвижность межузельных атомов, что способствует увеличению скорости диффузии. Перечисленные факторы будут способствовать получению качественного биметаллического соединения [3–5].

Однако, в реальных условиях даже кратковременный нагрев без защиты от окисления приводит к возникновению окисных пленок в стыке соединяемых частей составной заготовки, что ведет к ухудшению соединения. Наибольшую опасность представляет место непосредственного стыка где имеется возможность образования достаточно толстого слоя окислов. Для устранения данного недостатка моделью предусмотрена возможность выноса слоя окислов за пределы биметаллического соединения при формообразовании наконечника резца с выносом этих окислов на его поверхность (рисунок 7). На части же сопрягаемых поверхностей, удаленных от стыка, окисная пленка достаточно тонкая и ее разрушение будет происходить за счет воздействия импульсного нагружения и выхода дислокаций на сопрягаемые поверхности [4, 6].

Кроме того, в процессе формообразования резца за счет направленной деформации формируются «замковые» соединения в виде конических сопрягаемых поверхностей, способствующие дополнительной прочности биметаллического соединения.

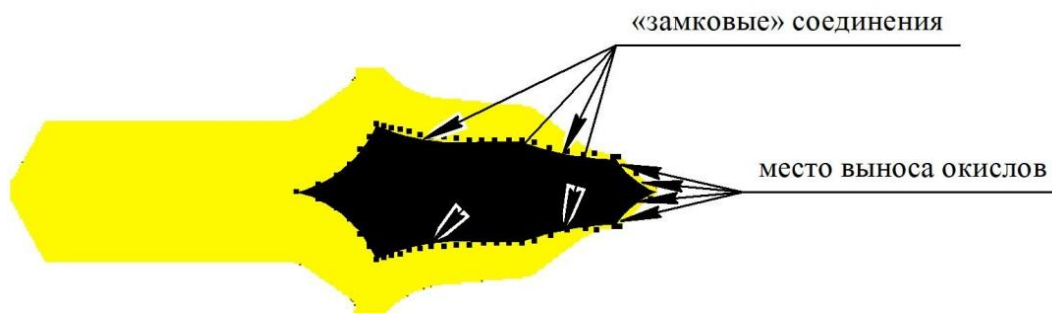


Рис. 7. Формирование качественного биметаллического соединения путем направленной деформации

Также было отмечено, что окончательное формообразование сопровождается схемой всестороннего неравномерного сжатия с увеличением сжимающих напряжений в 2–2,5 раза, что способствует «залечиванию» возможных непроваров и микротрещин на сопрягаемых поверхностях биметаллического соединения.

Выводы:

1. Разработана методика моделирования геометрических параметров биметаллического соединения при скоростном комбинированном выдавливании биметаллических дорожных резцов с помощью программного комплекса DEFORM-3D.

2. Установлено что, наиболее предпочтительные исходные высоты рабочей вставки $h_{и}$ лежат в пределах от 17 до 20 мм, что обусловлено нахождением основания конической вставки, при данных высотах, в наибольшем диаметральном сечении отштампованного резца.

3. Анализ моделей показал, что наиболее предпочтительными диаметрами исходной рабочей вставки $d_{и}$ можно считать диаметры, лежащие в диапазоне от 21 до 23 мм, обеспечивающий отсутствие сужающейся шейки на наконечнике, являющейся концентратором напряжений, что может привести к преждевременной поломке дорожного резца в ходе его работы.

4. В результате анализа движущих сил процесса образования биметаллического соединения в твердой фазе и картины пластического течения представленной модели установлены предпосылки для получения качественного биметаллического соединения по предложенной схеме деформирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паршин А. П. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM – 3D: учебное пособие / В. С. Паршин А. П. Карамышев, И. И. Некрасов и др., научн. Ред. Ю. Б. Чебулин. – Екатеринбург : УрФУ 2010. – 266 с.

2. Качанов И. В. Компьютерное моделирование в Deform-3D для анализа пластического течения при скоростном горячем выдавливании биметаллических формообразующих деталей штамповой оснастки / Computer Modeling in Deform-3D for Analysis of Plastic Flow in High-Speed Hot Extrusion of Bimetallic Formative Parts of Die Tooling / И. В. Качанов, М. В. Кудин, С. А. Ленкевич // Наука и техника. Серия 1. Машиностроение = Science & Technigue. Series 1. Mechanical engineering. – 2015. – № 1 – С. 20–25.

3. Каракозов Э. С. Сварка металлов давлением / Э. С. Кракозов. – М. : Машиностроение, 1986. – 280 с.

4. Качанов И. В. Технология получения биметаллических формообразующих деталей штамповой оснастки методом скоростного горячего выдавливания Technology for obtaining bimetallic shaping parts of die tooling using method of high-speed hot extrusion / И. В. Качанов, М. В. Кудин, С. А. Ленкевич // Наука и техника = Science & Technigue. – 2014. – № 4. – С. 65–70.

5. Базар В. Р. Физические основы упрочнения и разрушения материалов: учебное пособие / В. Р. Бараз, М. А. Филиппов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 192 с.

6. Качанов И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части / И. В. Качанов, Г. Н. Здор, Л. А. Исаевич, В. Н. Шарий. – Минск, БНТУ, 2011 – 198 с.

Поступила: 31.03.2022