

УДК 621.73.043

Явтушенко А. В.
Явтушенко А. В.
Красницкая И. В.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ И СИЛОВОЙ РЕЖИМ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ НА КГШП

При разработке технологического процесса горячей объемной штамповки одной из важных задач является определение технологического усилия деформации. В настоящее время существует больше десятка различных математических зависимостей для определения усилия горячей объемной штамповки в открытых штампах, полученные на базе различных инженерных методов определения удельного усилия. Интегрирование приближенных уравнений равновесия совместно с условиями пластичности или использование вариационных принципов механики позволили отказаться от полуэмпирических зависимостей и получить теоретически обоснованные зависимости. Тем не менее, сопоставление результатов расчетов по различным методикам, приведенное в многочисленных работах показывает большое отличие расчетных и экспериментальных данных. Сторожев М. В. [1] обратил внимание на очень важный вывод – все расчетные формулы имеют одинаковый характер отклонения от опытных данных для различных поковок, что свидетельствует о некотором технологическом факторе, который во всех формулах не учитывается.

Особую актуальность задача определения усилия горячей штамповки имеет при автоматизированном проектировании технологического процесса или технологической машины. На этой стадии проектирования, как правило, отсутствуют необходимые данные для точного расчета технологических параметров, что неизбежно приводит к большой погрешности расчетов. Кроме того, некоторые исходные данные в справочной литературе приводятся чаще всего дискретно в табличном виде [2], в то время как алгоритмизация расчетов при автоматизированном проектировании предполагает использование аналитических зависимостей определяемых данных в зависимости от параметров технологического процесса или технологической машины. При этом на стадии проектирования концептуального варианта процесса или машины высокая точность расчетов обычно не требуется.

Анализ экспериментальных данных и сопоставительный анализ точности расчетов по многим известным формулам дает основание предполагать, что основным фактором, определяющим расхождение расчетных и экспериментальных данных, является истинное сопротивление деформации σ_s при температуре конца технологического процесса. Накоплено достаточно большое количество опытных и экспериментальных данных по зависимости истинного сопротивления деформации от условий деформационного процесса, правда, нередко имеются несколько противоречивые выводы. Совокупное влияние различных факторов (химический состав, скорость и степень деформации, температура деформации, геометрические размеры изделия и др.) на сопутствующие процессы упрочнения и разупрочнения исключают возможность получения аналитических зависимостей для определения сопротивления деформации. Наиболее достоверные данные по определению прочностных характеристик сталей при горячей обработке давлением приведены в работе [3]. Для практических расчетов рекомендуется использовать эмпирическую зависимость истинного сопротивления деформации от термомеханических условий деформирования:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} k_t k_\varepsilon k_u, \quad (1)$$

где σ_{s0} – базисное напряжение текучести;

k_t, k_ε, k_u – соответственно, термомеханические коэффициенты температуры, степени деформации и скорости деформации.

Базисное напряжение текучести есть напряжение при усредненных условиях деформирования, которыми приняты: температура деформации $t_0 = 1000$ °С, степень деформации $\varepsilon_0 = 10$ %, скорость деформации $u_0 = 10$ с⁻¹. Термомеханические коэффициенты определяют степень отличия истинного сопротивления деформации при заданных условиях деформации от базовых условий. Значения термомеханических коэффициентов для большого набора различных марок сталей представлены в работе [3] в виде графических зависимостей.

Важным фактором, определяющим величину предела текучести, является температура обработки. Если температура начала обработки задается величиной верхней границы интервала ковочных температур T_n , то температура T_s последнего окончательного технологического перехода, как правило, не оговаривается. В практических расчетах принимаются значения T_s равные или температуре конца интервала ковочных температур T_k , или температура T_s принимается по субъективной оценке. Между тем температура T_s окончательного перехода штамповки определяется, прежде всего, интенсивностью охлаждения на всех предыдущих переходах и формой полуфабриката.

Целью настоящей работы является определение приближенных аналитических зависимостей для ориентировочного определения предела текучести металла в зависимости от температурно-силовых условий деформирования, формы и размеров поковки, параметров прессы, а также определение действительной скорости охлаждения поковок в процессе горячей штамповки в открытых штампах на КГШП.

В лабораторных условиях проведено экспериментальное определение истинного сопротивления деформированию некоторых сталей, для которых отсутствуют практические рекомендации. Исследования проводились на цилиндрических образцах, изготовленных из сталей 20, 30, 35, 45, 30Х, 40Х, 25ХГМ, 12ХНТА, 18ХГТ, 30ХГТ, 20ХНЗА и 15ХГН2ТА. Выбор марок сталей для исследования обусловлен преимущественным их использованием для изготовления поковок на Токмакском кузнечно-штамповочном заводе (ТКШЗ). Три марки сталей (сталь 20, 45, 18ХГТ) были выбраны для сопоставления полученных результатов с известными данными, приведенными в работе [3]. Испытания производились на испытательной машине УИМ-50 со скоростью деформирования от 0,04 мм/с до 0,1 мм/с, и на кривошипном прессе с максимальной скоростью деформирования до 0,24 м/с. Нагрев заготовок до температуры 800–1200 °С производился в электрических печах сопротивления в среде аргона с выдержкой при температуре испытания примерно 10 мин. Контроль температуры осуществлялся термопарой и контрольным потенциометром постоянного тока класса 0,5.

В результате математической обработки результатов экспериментальных исследований и анализа номенклатуры и технологических процессов на нескольких кузнечно-штамповочных заводах установлено следующее.

Традиционная классификация [4] поковок на круглые и близкие к ним и на удлиненные поковки в плане достаточна при массовом производстве поковок на универсальных прессах, когда на каждом прессе штампуются поковки как одного, так и другого класса. Для технологов и конструкторов такая классификация вполне приемлема, т. к. она однозначно определяет отличия и особенности конструкции штамповой оснастки и построение технологического процесса. Однако с точки зрения энергомеханических параметров работы прессы более уместно поковки классифицировать по критерию величины рабочего хода и затрат энергии на деформирование. В таком случае рационально поковки делить на т. н. *высокие* и *низкие*. К высоким поковкам будем относить поковки, для которых отношение высоты поковки к длине заготовки превышает 1,5 и преимущественной операцией штамповки является осаживание. К низким поковкам относятся поковки, для которых отношение высоты поковки к высоте заготовки (фактически ее диаметру) составляет менее 1,5, и преимущественной операцией штамповки таких поковок является расплющивание, гибка заготовок и полуфабрикатов, располагаемых плашмя. Весьма часто для низких поковок используется предварительное формоизменение в ковочных вальцах за один, иногда два прохода. Для низких поковок характерно значительно меньшая работа пластического деформирования. Степень деформации низких поковок значительно меньше, чем для высоких поковок, но скорость деформации больше. Для низких поковок степень деформации в окончательном переходе

штамповки не превышает 12–15 %, в то время как для высоких степень деформации достигает 20–25 %. Необходимо заметить, что поковки, штампуемые плашмя, могут относиться к классу высоких поковок, а поковки круглые в плане могут относиться к классу низких.

Сопоставление скоростных характеристик КГШП и особенностей деформации указанных классов поковок показывает, что для большинства поковок средняя скорость деформации в период, когда начинается вытекание металла в заусенец и усилие достигает максимального значения, остается постоянной и составляет примерно $5\text{--}7\text{ с}^{-1}$ для высоких поковок и не более $10\text{--}12\text{ с}^{-1}$ для низких поковок. При указанных степенях и скоростях деформации термомеханические коэффициенты k_ϵ и k_u изменяются незначительно и при расчете истинного сопротивления деформации их можно принимать постоянными, поэтому для низких поковок рекомендуется принимать $k_\epsilon = 1\text{...}1,1$, $k_u = 1$. Для высоких поковок рекомендуется принимать $k_\epsilon = 1,15\text{...}1,2$, $k_u = 0,9$.

Величина базисного напряжения текучести σ_{s0} в проведенных экспериментальных исследованиях в среднем соответствует данным, приведенным в работе [3], но для некоторых марок сталей полученные значения оказываются меньше примерно на 10–15 %, что очевидно, связано с различием скоростных характеристик и других условий деформирования.

Основным фактором, определяющим зависимость истинного сопротивления деформации, является температура заготовок. Математическая обработка полученных результатов позволяет установить следующую эмпирическую зависимость для определения термомеханического коэффициента температуры k_t :

$$k_t = C_0 e^{-T} + C_1, \quad (2)$$

где C_0 , C_1 – коэффициенты, зависящие от химического состава стали;

T – абсолютная температура заготовки, °К.

Эмпирические коэффициенты регрессии C_0 и C_1 принимаются равными для углеродистых сталей $C_0 = 25,1$; $C_1 = 0,32$, для низколегированных сталей $C_0 = 31,7$; $C_1 = 0,18$, для высоколегированных сталей $C_0 = 33,2$; $C_1 = 0,13$.

Базисное напряжение текучести σ_{s0} для сталей, данные по которым отсутствуют в работе [3], рекомендуется принимать равными: сталь 30 и 35 $\sigma_{s0} = 86$ МПа, сталь 30X и 40X $\sigma_{s0} = 88$ МПа; сталь 25ХГМ $\sigma_{s0} = 95$ МПа; сталь 30ХГТ $\sigma_{s0} = 119$ МПа; сталь 20ХНЗА $\sigma_{s0} = 116$ МПа; сталь 15ХГН2ТА $\sigma_{s0} = 95$ МПа.

В производственных условиях ТКШЗ проведена серия экспериментальных исследований, основными задачами которых являлось проверка лабораторных данных, сопоставление расчетных и экспериментальных данных по усилию штамповки и определению фактической температуры последнего окончательного перехода штамповки. Производственные исследования проводились на КГШП номинальным усилием 16, 25, 40 и 63 МН при штамповке типовых поковок из номенклатуры предприятия. Для измерения усилия использовали традиционные месдозы, устанавливаемые под штамповыми вставками в специальных проточках. Перемещение ползуна и углы поворотов главного вала измерялось фотоэлектрическими ходографами. Температура заготовок и полуфабрикатов измерялась несколькими методами. Общий контроль температуры осуществлялся оптическим пирометром ОПИР-0,9. Более точное измерение температуры производилось с помощью температурных клещей и калориметра. Температурные клещи представляют собой кузнечные клещи, в одну из губок которых на термоизоляторе установили рабочий конец (спай) термопары. Вывод термопары на конце клещей соединялись с электронным потенциометром ЭПД-12.

Для определения интенсивности охлаждения полуфабрикатов между технологическими переходами использовался метод измерения температуры в калориметре [5], как наиболее достоверный по сравнению с двумя вышеперечисленными. На каждой стадии эксперимента температура полуфабриката определялась по формуле:

$$t_i = \frac{Q_n}{c_m G_n} + t_{\text{вк}}, \quad (3)$$

где Q_n – количество тепла, отданного поковкой в калориметре;

$t_{\text{вк}}$ – конечная температура воды в калориметре;

G_n – масса поковки;

c_m – удельная теплоемкость металла поковки.

Перед началом эксперимента измерялась начальная температура $t_{\text{ен}}$ воды с помощью спиртового термометра с ценой деления $0,5^\circ\text{C}$. В определенный момент времени в калориметр помещался нагретый полуфабрикат, и производилось перемешивание воды для выравнивания ее температуры по всему объему. После выдержки измерялась конечная температура $t_{\text{ек}}$ воды и определялось приращение температуры $\Delta t = t_{\text{ек}} - t_{\text{ен}}$. Количество тепла, отданного поковкой, определялось по тарировочному графику в зависимости от приращения температуры Δt .

Определение скорости охлаждения производилось следующим способом. Температура t_0 заготовки на выходе из кузнечного нагревателя (КИНа) измерялась оптическим пирометром и температурными клещами. После поступления заготовки на первую позицию она немедленно погружалась в калориметр, определялась температура перед первым переходом t_{01} и потеря температуры $\Delta t_{01} = t_0 - t_{01}$ на участке подачи заготовок от КИНа до первой позиции. Следующая заготовка штамповалась на первой позиции и после этого также помещалась в калориметр – определялась температура t_1 после первого перехода и потеря температуры на первом переходе $\Delta t_1 = t_{01} - t_1$.

Измерение потери температуры при переносе на последующих переходах вследствие недостаточной точности измерения разности температуры производилось не после каждого переноса на следующую позицию, а для всех переносов вместе. Для этого полуфабрикат после первого перехода штамповки переносился на вторую позицию, затем немедленно переносился на третью, затем четвертую позиции штамповки и только после этого определялась потеря температуры на всех трех переносах Δt_{14} . С учетом того, что на каждом последующем переходе время транспортирования полуфабрикатов и их фиксации в штамповочном ручье увеличиваются из-за возрастающих сложностей позиционирования и усложнения формы полуфабрикатов, средние потери температуры на переносах между позициями приняты равными в среднем $\Delta t_{12} \approx 0,3\Delta t_{14}$, $\Delta t_{23} \approx 0,33\Delta t_{14}$, $\Delta t_{34} \approx 0,37\Delta t_{14}$. Следующие заготовки штамповались на втором и всех последующих переходах и каждый раз немедленно погружалась в калориметр – измерялась температура t_j после каждого перехода.

Результаты исследований показывают, что интенсивность охлаждения на каждом этапе обработки зависит от длительности охлаждения и соотношения геометрических параметров полуфабрикатов. Длительность пребывания полуфабрикатов на позициях обработки для каждого пресса практически остается постоянной и определяется интенсивностью технологического процесса, поэтому наиболее важным фактором, определяющим скорость охлаждения полуфабрикатов, является интенсивность теплообмена заготовки с окружающей средой.

При относительно большой интенсивности охлаждения определяющим является термическое сопротивление охлаждаемого тела, интенсивность охлаждения становится пропорциональной величине критерия Фурье, а коэффициентом пропорциональности является критерий конфигурации.

В практике расчетов процессов теплопередачи реальных тел обычно используют зависимости для теплопередачи некоторых тел простейшей формы, называемых *классическими*, а приведение к реальным телам осуществляют с помощью т. н. *критерия конфигурации*. Для тел, характеризующихся теплопередачей в трех координатных направлениях, классическим телом является шар, а критерий конфигурации представляется в виде [6]:

$$ks = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{\sqrt[3]{36\pi V^2}}, \quad (4)$$

где $S_{\bar{\sigma}}$, V – соответственно боковая поверхность и объем реального тела.

Для тел, в которых теплопередача происходит в двух координатных направлениях, классическим телом является цилиндр бесконечной длины. Критерий конфигурации для таких тел представляет собой зависимость от периметра и площади сечения. Однако для реальных поволоков удлиненных в плане цилиндр бесконечной длины классическим телом

не может быть, т. к. длина таких поковок конечна и не превышает, как правило, 3–7 диаметров заготовки. С другой стороны, теплопередача происходит интенсивно как в двух направлениях, перпендикулярных к оси так и в направлениях, совпадающих с осью заготовки. Наконец, изменение формы и размеров поперечного сечения таких поковок происходит наиболее интенсивно чаще всего на торцах, где и происходит интенсивное их охлаждение. Сопоставление таких поковок с цилиндром бесконечной длины не корректно, и поэтому критерием конфигурации поковки остается критерий для сферического классического тела с учетом изменения поперечного сечения по длине. Для реальных тел критерий конфигурации всегда больше единицы (для классического тела критерий конфигурации $ks = 1$).

Для удлиненных поковок сложной формы определение критерий конфигурации ks затруднено ввиду сложной формы наружной поверхности и в силу вышеуказанной особенности удлиненных поковок. В качестве ориентировочных данных можно указать следующее. Начальная заготовка для таких поковок представляет собой цилиндр с отношением длины к диаметру примерно 3...5. По формуле (4) коэффициент формы ks_0 такого тела составляет 1,2...1,6. Для поковок удлиненной формы без значительных местных утолщений и перепадов диаметров (поковки группы II) основными технологическими операциями являются гибка, плющение и предварительная штамповка, при которых значительного изменения площади боковой поверхности не происходит. Для таких поковок после предварительных переходов можно принимать коэффициент формы $ks_1 = (1,05...1,1)ks_0$. Предварительная вальцовка заготовок увеличивает коэффициент формы ks_0 за каждый проход примерно на 5–9 %. В окончательном штамповочном переходе поковок группы II значительного изменения площади боковой поверхности не происходит и коэффициент формы увеличивается не более чем на 15 %. Для удлиненных поковок со значительным изменением поперечного сечения, с разветвлениями и т. д. (поковки групп III–V), как правило, на первом переходе штамповки производятся штамповочные операции без значительного изменения площади боковой поверхности заготовки (формовка, гибка, предварительная штамповка), поэтому коэффициент формы ks принимается как и для поковок подгруппы II. На последующих переходах производится местный набор металла, разделение части заготовки на отдельные разветвления, поэтому площадь боковой поверхности увеличивается, и коэффициент формы ks на этих переходах увеличивается на 30...45 %.

Критерий конфигурации для осесимметричных поковок может быть определен аналитическим методом. Если аналитическое определение критерия конфигурации невозможно или затруднено, можно воспользоваться следующими рекомендациями. Исходная заготовка для штамповки высоких поковок представляет собой цилиндр с соотношением длины заготовки к ее диаметру примерно 2...3. По формуле (4) для такого соотношения размеров критерий конфигурации заготовки ks_0 составляет 1,18...1,21. После осадки отношение размеров осаженой заготовки приближается к единице и критерий конфигурации заготовки ks_1 составляет примерно 1,15...1,2. При штамповке в последующих ручьях принимать, что после штамповки в предварительном переходе $ks_2 = (1,15...1,3)ks_1$, после штамповки в окончательном переходе $ks_3 = (1,3...1,4)ks_2$. Во всех случаях большие значения необходимо принимать для поковок более высокой подгруппы по классификации [4].

В производственных условиях проведена проверка влияния формы заготовки на интенсивность охлаждения. Производилось измерение температуры нескольких групп различных по форме заготовок и поковок примерно одинаковой массы на всех этапах технологического процесса, а сопоставление результатов производилось по контрольным экспериментальным поковкам. Для поковок группы I контрольная поковка представляла собой шар, масса которого равна средней массе штампуемых поковок. Для поковок групп II–IV контрольная поковка имела форму цилиндра, длина которого равнялась удвоенному диаметру. Количество поковок в каждой группе составляло не менее 5, а общее количество групп (6) охватывало поковки массой от 0,5 до 17,5 кг. Для исследованных поковок отклонение массы внутри каждой группы составляло не более 7 %. Экспериментальные поковки группы I штамповалась в четырех переходах с переходом поочередно от цилиндра с закругленными торцами и отношением высоты к диаметру равным единице к шару, и наоборот. Таким образом,

площадь боковой поверхности при этом практически не изменялась, и коэффициент формы таких поковок оставался неизменным $k_s \approx 1$. Для контрольных поковок групп II–IV производилась вальцовка, затем они штамповались в гибочном, предварительном и окончательном ручьях.

На рис. 1 представлен пример экспериментального исследования и теоретического расчета изменения температуры поковки «шестерня ведущая заднего моста» грузового автомобиля. Для сравнения показана кривая изменения температуры классического тела – шарообразной поковки. Этапы обработки обозначены на рисунке цифрами: 0 – выход из КИНа; 1 и 2 – начало и конец операции осадка; 3 и 4 – начало и конец первой предварительной штамповки; 5 и 6 – начало и конец второй предварительной штамповки; 7 и 8 – начало и конец окончательного перехода штамповки.

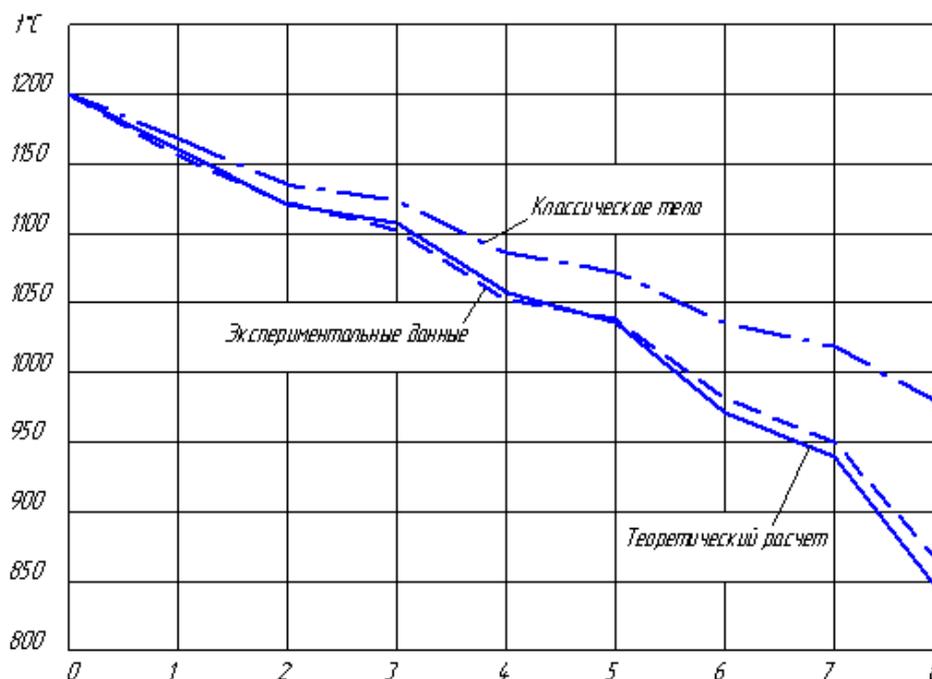


Рис. 1. Изменение температуры заготовки и полуфабрикатов по переходам штамповки

Результаты экспериментов показывают, что снижение температуры Δt_{01} заготовки при переносе заготовок от КИНа до первой позиции штамповки зависит, прежде всего, от расстояния L_{01} между КИНам и первой позицией штамповки (расстояние транспортирования) и способа транспортирования. При перемещении заготовок по склизу снижение температуры составляет в среднем $\Delta t_{01} = 12\text{--}16$ °C на одном метре расстояния L_{01} , а при транспортировании заготовок цепным транспортером – $\Delta t_{01} = 16\text{--}24$ °C на одном метре расстояния L_{01} .

Для поковок близких к сферическим, т. е. для контрольной поковки группы I среднее снижение температуры при переносах между позициями может приниматься $\Delta t_{12} = 8\text{--}13$ °C, $\Delta t_{23} = 10\text{--}15$ °C, $\Delta t_{34} = 16\text{--}19$ °C. Для контрольных поковок групп II–IV снижение температуры при переносах в среднем составляет: $\Delta t_{12} = 12\text{--}16$ °C, $\Delta t_{23} = 14\text{--}19$ °C, $\Delta t_{34} = 18\text{--}22$ °C.

В штамповочных ручьях средние потери температуры составляют для контрольных поковок группы I при осадке $\Delta t_1 = 30\text{--}36$ °C, при предварительных переходах штамповки $\Delta t_{2,3} = 34\text{--}39$ °C, в окончательном переходе $\Delta t_4 = 40\text{--}45$ °C. Для контрольных поковок групп II–IV потери температуры составляют при вальцовке $\Delta t_1 = 32\text{--}45$ °C, при гибке и предварительной штамповке $\Delta t_{2,3} = 40\text{--}47$ °C, в окончательном ручье $\Delta t_4 = 46\text{--}51$ °C. Большие значения принимаются для поковок меньшей массы.

Для заготовок произвольной формы, отличающейся от шара, указанные снижения температуры необходимо умножить на критерий конфигурации на соответствующем этапе обработки. В результате температуру заготовки на k -м этапе обработки можно определить по следующей приближенной формуле:

$$t_k = t_{n0} - \sum_{i=1}^N \Delta t_{i-1,i} k s_{i-1,i} - \sum_{j=1}^{N-1} \Delta t_j k s_j, \quad (5)$$

где t_{n0} – температура нагрева при выходе заготовки с нагревателя;

N – общее количество штамповочных переходов;

$\Delta t_{i-1,i}$ – снижение температуры на этапе переноса заготовки с $i-1$ -й позиции на i -ю позицию;

k_j – критерий конфигурации полуфабриката на j -м переходе;

Δt_j – снижение температуры после штамповки на j -м переходе.

Погрешность определения температуры заготовки и полуфабрикатов по формуле (5) с учетом расчетных и рекомендуемых значений критерия конфигурации составляет не более 7,5 %. Таким образом, представленные зависимости можно использовать для приближенного расчета температуры заготовки и истинного сопротивления деформации в зависимости от сложности формы поковки, количества переходов и скорости деформирования. Сопоставление экспериментальных значений усилий штамповки для 15 поковок из номенклатуры ТКШЗ при уточненных значениях истинного сопротивления деформации показывает, что наиболее точными расчетными зависимостями для определения усилия горячей объемной штамповки на КГШП являются формулы, приведенные в работе [4]. Наибольшая погрешность расчетов не превышает, как правило, 15–25 %.

ВЫВОДЫ

Определена приближенная аналитическая зависимость для определения предела текучести стали в зависимости от температуры деформации и скорости деформирования. Установлен критерий для оценки степени снижения температуры заготовки на всех этапах технологического процесса штамповки – критерий конфигурации. Определены средние величины снижения температуры заготовки при ее переносе между позициями и на штамповочных переходах, а также аналитическая зависимость для определения температуры поковки на каждом переходе штамповки. Полученные результаты могут использоваться как первое приближение при ручном и автоматизированном проектировании технологического процесса горячей объемной штамповки на КГШП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сторожев М. В. По поводу статьи И. И. Григорьева и Р. А. Вайсбурда / М. В. Сторожев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1964. – № 6. – С. 48–49.*
2. *Ковка и штамповка : справочник. В 4-х т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1985. – 568 с.*
3. *Третьяков А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.*
4. *Ковка и штамповка : справочник. В 4-х т. Т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е. И. Семенова. – М. : Машиностроение, 1986. – 592 с.*
5. *Миропольский Ю. А. Исследование пресс-автоматов для объемной штамповки / Ю. А. Миропольский. – М. : Машиностроение, 1968. – 157 с.*
6. *Вейник А. И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи / А. И. Вейник. – М. : Металлургия, 1965. – 375 с.*

Явтушенко А. В. – канд. техн. наук, доц. ЗНТУ;

Явтушенко А. В. – канд. техн. наук, доц. ЗНТУ;

Красницкая И. В. – студент ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: ayav2008@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 01.03.2012 г.