

УДК 620.4539.37

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

Л.А. Исаевич, д.т.н., проф., И.В. Качанов, к.т.н., доц., В.Ф. Кондратюк, к.т.н., доц.

Современное развитие промышленного производства требует использования высокопроизводительных, энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение изделий с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В этой связи большими потенциальными возможностями обладают процессы скоростной штамповки, позволяющие за один удар получать изделия с повышенными значениями коэффициента использования металла и точности размеров. Благодаря ряду преимуществ (повышение однородности деформированного состояния, снижение сил контактного трения, адиабатное повышение температуры) процессы скоростной штамповки создают благоприятные условия для обработки труднодеформируемых и малопластичных материалов. Эффективность скоростной штамповки значительно возрастает за счет реализации ее в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), позволяющей дополнительно снизить трудовые и энергетические затраты на изготовление изделий и зафиксировать в них благоприятные изменения в микро- и тонкой структурах, вызванные высокой скоростью деформации.

Однако для прогнозирования целого ряда параметров уже на стадии разработки ударных технологий необходимы данные о прочностных показателях $\sigma_{рд}$, $\sigma_{вд}$, $\sigma_{тд}$, ($\sigma_{рд}$, $\sigma_{вд}$, $\sigma_{тд}$ - соответственно значения динамических напряжений разрушения, пределов прочности и текучести) используемых материалов в условиях динамического нагружения при температурах штамповки.

В настоящее время для определения упомянутых прочностных показателей в основном используются разнообразные методы ударного растяжения стандартных образцов, которые в ряде случаев дополняются данными о поведении материалов при скоростной осадке, кручении, технологических испытаниях [1-4]. Оценивая современные методы испытаний на ударное растяжение, следует отметить их трудоемкость (для проведения испытаний необходимо использование специальных опытных образцов), недостаточную высокую корректность (при высоких скоростях нагружения регистрируемая нагрузка в момент шейкообразования или разрушения включает инерционную составляющую, величина которой соизмерима с определяемой нагрузкой [4]), сложность реализации (при испытаниях с нагревом необходимо использовать как дополнительные устройства, предназначенные для исключения теплопотерь нагретого образца в захватах машины, так и системы охлаждения, устраняющие влияние источника высокой температуры на показания тензодатчи-

ков) [2].

Лишенным отмеченных недостатков является метод динамических испытаний материалов на одноосное растяжение под действием инерционной нагрузки, разработанный на кафедре "Машины и технологии ОМД" Белорусского национального технического университета [5,6]. Для создания указанной инерционной нагрузки предварительно нагретые образцы деформировались по схеме ударного выдавливания на установках импульсного действия. При этом нагружение образцов осуществлялось пуансонами переменной массы, которые разогнались на указанных установках до скорости $V_0 = 90 \div 150$ м/с.

Поскольку в процессе деформирования скорость пуансона имеет затухающий характер, то это приводит к замедленному движению (движение с отрицательным ускорением) стержневой части на выходе из матричного очка. Результатом такого движения является формирование инерционной растягивающей нагрузки, под действием которой происходит шейкообразование (рис. 1, а) или разрушение стержневой части изделия (рис. 1, б, в) практически по схеме одноосного растяжения [5].

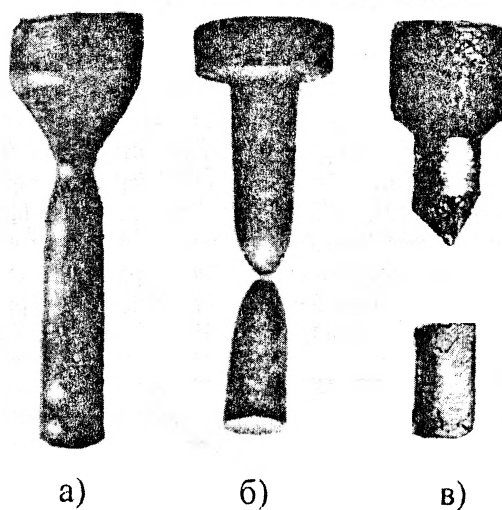


Рис. 1.

Для определения указанной инерционной нагрузки была разработана измерительная схема, приведенная на рис. 2. Эта схема представляет один из вариантов кинематического метода определения усилия, основанного на построении зависимости "путь-время". Отличительным признаком разработанной схемы является то, что она позволяет зарегистрировать перемещение и момент разрушения стержневой части на выходе из матричного очка. В составе блок-схемы

использовались оптические квантовые генераторы 1, 2, система линз 3, 4, фотодиод 5 запуска генератора развертки лучей осциллографа С1-18 (наряду с запуском развертки сигнал с фотодиода 5 поступал на вход Y_1 осциллографа и использовался для записи начальной скорости V_0 пуансона), фотодиод 6, предназначенный для регистрации перемещения стержневой части, матрица 7 для деформации заготовки 8 и пуансон 9. Во избежание разрушения матрицы 7 она запрессовывалась с натягом в коническую обойму 10.

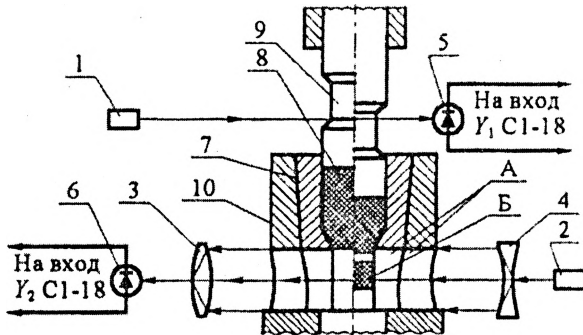


Рис. 2.

Для прохождения светового потока от квантового генератора 2 в фотодиод 6 в матрице 7 и обойме 10 был выполнен прямоугольный паз А шириной 5 мм. Поскольку паз А имел прямоугольное сечение, то перемещение в процессе выдавливания стержневой части Б на одинаковое расстояние сопровождалось пропорциональным изменением светового потока, направленного в фотодиод 6. Отмеченное обстоятельство оказывает существенное влияние на вид тарировочного графика, который характеризуется линейной зависимостью отклонения луча h_n на экране осциллографа от перемещения $h_{ст}$ стержневой части Б (рис. 3). Здесь следует заметить, что линейный характер тарировочного графика $h_n = f(h_{ст})$ дает определенные преимущества, обусловленные упрощением процесса его построения (для построения линейного графика достаточно иметь 3-4 точки) и повышением точности расшифровки осциллограмм $h_n(t)$.



Рис. 3.

Типовые осциллограммы, полученные с помощью описываемой измерительной схемы, приведены на

рис. 4. Расшифровка импульса, записанного с помощью осциллограммы А, позволяет по известной скорости развертки определить начальную скорость V_0 пуансона 9 перед соударением с заготовкой 8. Обработка второй осциллограммы $h_n(t)$ (осциллограмма В на рис. 4) совместно с тарировочным графиком $h_n = f(h_{ст})$ позволяет путем исключения параметра h_n построить зависимость $h_{ст} = f(t)$ "перемещение стержневой части-время" (рис. 5, а). Двойное дифференцирование зависимости $h_{ст} = f(t)$ позволяет построить график $\omega_{ст} = f(t)$, отражающий изменение ускорения $\omega_{ст}$ стержневой части Б выдавленного изделия в функции времени t процесса (рис. 5, б).

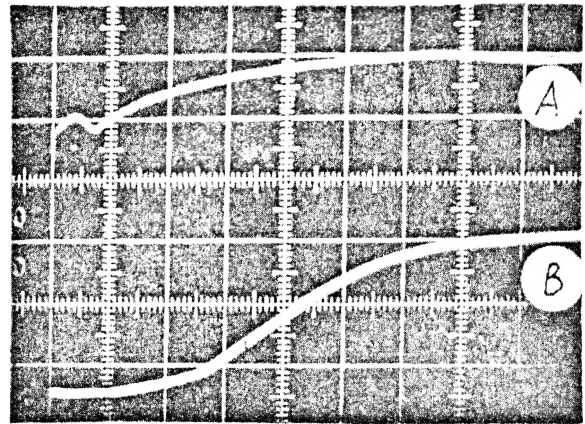


Рис. 4.

Для пояснения методики обработки опытных данных рассмотрим схему пластического разрушения стержневой части, приведенную на рис. 5, в. Из анализа этой схемы видно, что моменту разделения частей I и II предшествует пластическое растяжение стержневой части между сечениями 1-1 и 2-2. Процесс пластического растяжения стержневой части сопровождается формированием шейки между указанными сечениями с последующим ее разрушением в сечении 3-3.

С учетом сказанного обозначим длину оторвавшейся части I через $l_{от}$. По длине $l_{от}$ на графике $h_{ст} = f(t)$ (рис. 5, а) устанавливается время отрыва $t_{от}$, по которому в свою очередь определяется ускорение $\omega_{от}$ части I в момент отделения ее от части II (рис. 5, б).

Динамическое напряжение (условное) разрушения $\sigma_{рд}$, вызывающее отрыв стержневой части I от части II, определяется на основании второго закона Ньютона по известным значениям оторвавшейся массы материала $m_{от}$ и ускорения $\omega_{от}$ части I в момент отрыва

$$\sigma_{рд} = \frac{m_{от} \omega_{от}}{\pi d_{ст}^2 / 4}, \quad (1)$$

где $d_{ст}$ - диаметр стержневой части I выдавленного изделия (рис. 5, в). Аналогичным образом определяется и динамический предел прочности $\sigma_{вд}$. Для этого предварительно на оторвавшейся стержневой части измеряется отрезок $l_{ш}$ (рис. 5, в), определяющий расстояние от торцевой части (сечение 0-0) до сечения 1-1, в котором под действием инерционной растягивающей нагрузки начинает формироваться шейка. Затем

по известному значению $l_{ш}$ на графиках $h_{ст} = f(t)$ и $\omega_{ст} = f(t)$ определяются время $t_{ш}$ и ускорение $\omega_{ш}$, соответствующие моменту начала шейкообразования на стержневой части изделия за матричным очком (рис. 5, а, б). После определения указанных параметров величина $\sigma_{вд}$ рассчитывается по формуле

$$\sigma_{вд} = \frac{m_{ш}\omega_{ш}}{\pi d_{ст}^2 / 4} \quad (2)$$

где $m_{ш}$ - масса материала, находящаяся в стержневой части I между сечениями 0-0 и 1-1.

Величина массы $m_{ш}$ определяется путем взвешивания образца, оставшегося после отделения от стержневой части I усеченного конуса с диаметрами оснований $d_{ст}$ и $d_{ш}$ ($d_{ш}$ - диаметр шейки по месту разрушения (рис. 5, в)).

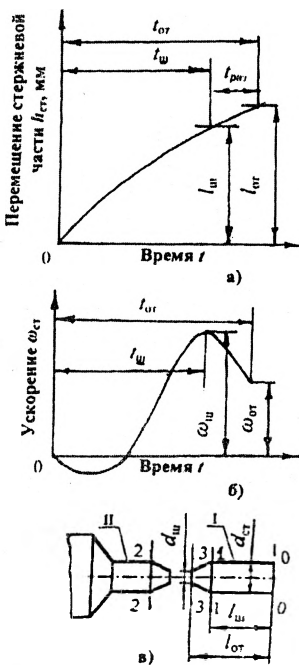


Рис. 5.

При определении динамического предела текучести $\sigma_{тд}$ примем во внимание выводы, изложенные в работах [7, 8]. Авторы этих работ отмечают, что при ударном растяжении материалов, нагретых до высоких температур, динамический предел текучести $\sigma_{тд}$ достаточно близок к динамическому пределу прочности $\sigma_{вд}$ и при испытаниях практически не выявляется. Учитывая сказанное, при определении величины $\sigma_{тд}$ будем

исходить из условия, что $\sigma_{тд} = \sigma_{вд}$, т.е. устанавливая по формуле (2) величину $\sigma_{вд}$, будем считать, что полученные результаты без большой погрешности можно использовать для определения динамического предела текучести $\sigma_{тд}$ исследуемых материалов.

Наряду с определением механических свойств, важное значение придается и установлению скорости деформации $\dot{\epsilon}$, при которой проводились испытания. Для определения среднего значения скорости деформации $\dot{\epsilon}$ в процессе растяжения стержневой части используем известную зависимость [1]

$$\dot{\epsilon}' = \frac{\epsilon}{t_{раз}}, \quad (3)$$

где ϵ - степень деформации; $t_{раз}$ - время разрушения стержневой части (принимая во внимание данные из рис. 5, а, б, $t_{раз} = t_{от} - t_{ш}$).

Значения степени деформации ϵ в формуле (3) рассчитывается как и при обычных испытаниях на одноосное растяжение [9], т.е.

$$\epsilon = \frac{\Psi}{1 - \Psi}, \quad (4)$$

где Ψ - относительное сужение поперечного сечения. Величина Ψ в формуле (4) определяется по зависимости

$$\Psi = \frac{F_{ст} - F_{ш}}{F_{ст}}, \quad (5)$$

где $F_{ст} = \pi d_{ст}^2 / 4$ - площадь стержневой части в сечении 1-1; $F_{ш} = \pi d_{ш}^2 / 4$ - площадь шейки в сечении 3-3 по месту ее наибольшего утонения или разрушения (рис. 5, в).

По рассмотренной методике были проведены динамические испытания ряда материалов (штампинструментальные стали 5ХНМ, У10, 5ХЗВЗМФС, конструкционная сталь 1Х18Н10Т) при различных значениях начальной температуры нагрева T_0 . Испытания проводились на цилиндрических образцах высотой 30 мм и диаметром 20 мм. Образцы деформировались по схеме выдавливания с коэффициентом вытяжки $\lambda=4$. Для обеспечения разрушения стержневой части на выходе из матричного очка начальная скорость удара пуансона с массой 0,7 кг составляла 143 м/с. Некоторые результаты проведенных испытаний представлены в таблице.

Таблица

Результаты испытаний материалов на динамическое растяжение под действием инерционной нагрузки

Испытуемый материал	Температура нагрева T_0 , °С	Начальная скорость удара V_0 , м/с	Скорость деформации $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	Динамический предел прочности $\sigma_{вд}$, МПа	Постоянная пластичности k , МПа
5ХЗВЗМФС	1150	143	12400	261	151
5ХНМ	860	143	18600	283	164
У10	820	143	21700	302	175
1Х18Н10Т	1180	143	870	258	148

Значения постоянной пластичности k в приведенной таблице, определялись по условию Губера-Мизеса [9]

$$k = \frac{\sigma_{гд}}{\sqrt{3}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{гд}$ - динамический предел текучести.

При расчетах постоянной пластичности k , принимая во внимание отмеченные выше результаты работ [7, 8], в формулу (6) вместо динамического предела текучести $\sigma_{гд}$ подставляли значения динамического предела прочности $\sigma_{вд}$, найденные с использованием зависимости (2).

Приведенные в таблице данные, имеют существенное значение для прогнозирования ряда параметров (пиковые нагрузки, действующие на инструмент, инерционные напряжения в теле поковки, номинальная энергия удара, допустимые скорости деформирования и т.д.), которые необходимо знать при разработке технологий скоростной штамповки. Существенное значение имеет и то обстоятельство, что расчет указанных параметров становится возможным и для процессов скоростной штамповки, реализуемых в режиме ВТМО. Обусловлено это тем, что для ряда материалов испытания на динамическое растяжение проводили при температурах ВТМО, значения которых для сталей 5ХНМ, У10, 5ХЗВЗМФС равны соответственно 860 °С, 820 °С, 1150 °С [10].

Оценивая приведенные в таблице результаты для стали 1Х18Н10Т, необходимо отметить, что они вполне согласуются с данными автора [11], полученными для данного материала ($\sigma_{вд} = 250$ МПа, $\dot{\epsilon} = 890$ с⁻¹, $T = 1180$ °С) при испытаниях по схеме скоростной осадки образцов. Указанное соответствие результатов, достигнутое при использовании различных схем нагружения показывает, что разработанная на основе способа [5] методика динамических испытаний является достаточно корректной (степень расхождения значений $\sigma_{вд}$, найденных по двум методам испытаний, не превышает 5,8%) и вполне может быть рекомендована для определения прочностных свойств материалов в широком температурно-скоростном диапазоне условий деформирования. Это весьма актуально для разработки и внедрения разнообразных процессов скоростной штамповки.

Обобщение вышеизложенного материала позволяет сделать следующие выводы.

1. Действие сил инерции в процессе скоростного выдавливания при определенных условиях (при достижении или превышении инерционными напряжениями значений предела прочности) сопровождается шейкообразованием или разрушением стержневой части на выходе из матричного очка.

2. На основе использования эффекта от действия инерционной растягивающей нагрузки на стержневую часть изделия при ее замедленном движении в процессе скоростного выдавливания через матричное очко, разработан новый метод динамических испытаний материалов [5].

3. Для регистрации инерционной нагрузки разработана измерительная схема, позволяющая определить

ускорение стержневой части в заданные моменты времени (момент шейкообразования или разрушения стержневой части).

4. Предложена методика обработки опытных данных, позволяющая определить значения динамических напряжений разрушения $\sigma_{рд}$, а также динамических пределов прочности $\sigma_{вд}$ и текучести $\sigma_{гд}$ и постоянной пластичности k .

5. На основании проведенных экспериментов установлены достаточно высокая корректность, сравнительная простота и низкая трудоемкость нового метода динамических испытаний материалов, что указывает на его определенную перспективность при проведении экспресс-анализа прочностных свойств материалов в широком температурно-скоростном диапазоне условий деформирования, характерном для разнообразных процессов скоростной штамповки.

Литература.

1. Агеев И.П., Каратушин С.И. Механические испытания металлов при высоких температурах и кратковременном нагружении. - М.: Металлургия, 1969. - 280 с.
2. Волошенко-Климовицкий Ю.Я. Динамический предел текучести. - М.: Наука, 1965. - 179 с.
3. Беляев В.И., Зинкевич В.И., Ковалевский В.Н., Скоков П.Н. Некоторые вопросы методики динамического растяжения металлов. - В кн.: Новая техника и прогрессивная технология. - Минск: Вышэйшая школа, 1969. С. 311-313.
4. Высокоскоростное, малоотходное деформирование металлов в штампах./Под ред. В.Г. Кононенко.-Х.: Вища школа, 1985. - 176 с.
5. А.с. 1108348 СССР. Способ динамических испытаний материалов /М.В. Степашко, М.А. Барановский, И.В. Качанов (СССР). - 1984, Бюл. №30.
6. Качанов И.В., Степашко М.В. К вопросу определения динамического предела текучести. В сб.: Материалы Республ. научн-метод. семинара преп. каф. теор. механики, ТММ, сопр. матер. вузов Беларуси. - Минск, - 2000. С. 107-108.
7. Жученко А.Н. Влияние сил инерции на процесс высокоскоростного выдавливания поковок. - В кн.: Высокоскоростная объемная штамповка. - М.: Машиностроение, 1969. - С. 59-84.
8. Определение механических характеристик инструментальных сталей при температурах 400-700°С в диапазоне скоростей деформирования 1-20 м/с. Отчет по НИР. Рук. Е.К. Почтенный. №Г.Р. 69001815, инв. №Б101665. - Минск, ЭНИИМАЗ, 1970. - 60 с.
9. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Машиностроение. - 1977. - 423 с.
10. Фетисов Г.П., Карпман М.Г. Материаловедение и технология металлов. - М.: Высшая школа. - 2001. - 495 с.
11. Жученко А.Н. Исследование прессования поковок с учетом действия сил инерции. Автореф. Дис. канд. техн. наук. - М. 1970. - 21 с.