ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ МАТЕРИАЛОВ ИНЕРЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ

Докт. техн. наук, проф. ИСАЕВИЧ Л. А., канд. техн. наук, доц. КАЧАНОВ И. В.

Белорусский национальный технический университет

Эффективность современной металлообработки существенным образом зависит от разработки и создания высокопроизводительных, энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение изделий широкого функционального назначения с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Как показывает опыт, большими потенциальными возможностями в этом направлении обладают процессы скоростной штамповки, позволяющие за один удар получать высококачественные изделия с требуемой точностью размеров и формы. Эффективность указанных процессов значительно возрастает за счет их реализации в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), позволяющей дополнительно снизить трудо- и энергозатраты и зафиксировать в изделиях благоприятные структурные изменения, вызванные высокой скоростью деформации [1].

Однако для прогнозирования целого ряда параметров (пиковая нагрузка, энергия удара, тепловой эффект деформации, допустимая скорость инструмента) уже на стадии разработки ударных технологий необходимы данные о прочностных показателях $\sigma_{pд}$, $\sigma_{вд}$, $\sigma_{\tau d}$, (σ_{pd} , $\sigma_{вd}$, $\sigma_{\tau d}$ – соответственно значения динамических напряжений разрушения, пределов прочности и текучести) и постоянной пластичности *k* материалов в условиях динамического нагружения при температурах штамповки.

В настоящее время для определения указанных 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 [2–5]. Оценивая современные методы испытаний на ударное растяжение, следует отметить их трудоемкость (для проведения испытаний необходимо использование специальных опытных образцов), недостаточно высокую корректность (при высоких скоростях нагружения регистрируемая нагрузка в момент шейкообразования или разрушения включает инерционную составляющую, величина которой соизмерима с определяемой нагрузкой [5]), сложность реализации (при испытаниях с нагревом необходимо использовать системы охлаждения, устраняющие влияние источника высокой температуры на показания тензодатчиков, а также дополнительные устройства, исключающие теплопотери нагретого образца в захватах машины [3]).

Лишенным отмеченных недостатков является новый способ динамических испытаний материалов на одноосное растяжение под действием инерционной нагрузки, разработанный на кафедре машин и технологий ОМД имени С. И. Губкина в Белорусском национальном техническом университете [6, 7]. 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 разгонялись на импульсных установках до скорости $V_0 = 90...150$ м/с.

Поскольку в процессе деформирования скорость пуансона имеет затухающий характер, это приводит к замедленному движению (с отрицательным ускорением) стержневой части на выходе из матричного очка. Результатом такого движения является формирование инерционной растягивающей нагрузки, под действием которой происходит шейкообразование (рис. 1а) или разрушение стержневой части изделия (рис. 16, в) по схеме одноосного растяжения [6].



Рис. 1. Шейкообразование (а), пластическое (б) и хрупкое (в) разрушения на стержневой части выдавленного изделия при действии инерционной растягивающей нагрузки; а – сталь 5ХНМ; б – 5ХЗВЗМФС; в – чугун КЧЗ7-12

Для регистрации указанной инерционной нагрузки была разработана измерительная схема, приведенная на рис. 2. Эта схема представляет



Рис. 2. Схема комплексной регистрации кинематики пуансона и стержневой части изделия в процессе скоростного выдавливания заготовки [6, 7]

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 У1 осциллографа и использовался для записи начальной скорости V₀ пуансона), фотодиод 6, предназначенный для регистрации перемещения стержневой части, матрица 7 для деформации заготовки 8 и пуансон 9. Во избежание разрушения матрицы она запрессовывалась с натягом в коническую обойму 10. Для прохожде-

в фотодиод 6 в матрице и обойме был выполнен прямоугольный паз А шириной 5 мм. Поскольку паз А имел прямоугольное сечение, 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_{π} на экране осциллографа от перемещения $h_{\rm cr}$ стержневой части Б (рис. 3). Следует заметить, что линейный характер тарировочного графика $h_{\pi} = f(h_{cT})$ дает определенные преимущества, обусловленные упрощением процесса его построения (для построения линейного графика достаточно иметь 3-4 точки) и повышением точности расшифровки осциллограмм $h_{\pi}(t)$.

ния светового потока от квантового генератора 2



Рис. 3. Тарировочный график для определения перемещения стержневой части

Типовые осциллограммы, полученные с помощью описываемой измерительной схемы, приведены на рис. 4. Расшифровка импульса, записанного с помощью осциллограммы В, позволяет по известной скорости развертки определить начальную скорость V_0 пуансона 9 перед соударением с заготовкой 8. Обработка второй осциллограммы $h_n(t)$ (осциллограмма Г на рис. 4) совместно с тарировочным графиком $h_n = f(h_{cr})$ позволяет путем исключения параметра h_n построить зависимость $h_{cr} = f(t)$ «перемещение стержневой части-время» (рис. 5а). Дифференцируя дважды зависимость $h_{cr} = f(t)$, определяются точки для построения графика $\omega_{cr} = f(t)$, отражающего изменение ускорения ω_{cr}

части Б выдавленного изделия в функции време-

ни t (рис. 5б).

Рис. 4. Осциллограммы кинематики пуансона (В) и стержневой части изделия (Г) при скоростном выдавливании за-



Рис. 5. Схема обработки опытных данных

Для пояснения методологии обработки опытных данных рассмотрим схему пластического разрушения стержневой части, приведенную на рис. 5в. 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. Учитывая сказанное, обозначим длину оторвавшейся части I через lor. По длине lor на графике $h_{ct} = f(t)$ (рис. 5а) устанавливается время отрыва tor, по которому в свою очередь определяется ускорение ω_{ot} части I в момент отделения ее от части II (рис. 5б).

Динамическое напряжение (условное) разрушения σ_{pg} , вызывающее отрыв стержневой части I от части II, определяется на основании второго закона Ньютона по известным значениям оторвавшейся массы материала m_{ot} и ускорения ω_{ot} части I в момент отрыва

$$\sigma_{\rm pa} = \frac{m_{\rm or}\omega_{\rm or}}{\pi d_{\rm cr}^2 / 4} , \qquad (1)$$

где d_{cr} – диаметр стержневой части I выдавленного изделия (рис. 5в). Аналогичным образом определяется и динамический предел прочности σ_{вд}. Для этого предварительно на оторвавшейся стержневой части измеряется отрезок l_ш (рис. 5в), определяющий расстояние от торцовой части (сечение 0-0) до сечения 1-1, в котором под действием инерционной растягивающей нагрузки начинает формироваться шейка. Затем по известному значению $l_{\rm m}$ на графиках $h_{\rm cr} = f(t)$ и $\omega_{ct} = f(t)$ определяются время $t_{\rm m}$ и ускорение $\omega_{\rm m}$, соответствующие моменту начала шейкообразования на стержневой части изделия за матричным очком (рис. 5а, б). После определения указанных параметров величина овд рассчитывается по формуле

$$\sigma_{\rm BH} = \frac{m_{\rm III} \omega_{\rm III}}{\pi d_{\rm cr}^2 / 4} , \qquad (2)$$

где $m_{\rm m}$ – масса материала, находящаяся в стержневой части I между сечениями 0–0 и 1–1.

Величина массы *m*_ш определяется путем взвешивания образца, оставшегося после отделе-

ния от стержневой части I усеченного конуса с диаметрами оснований $d_{\rm cr}$ и $d_{\rm m}$ ($d_{\rm m}$ – диаметр шейки по месту разрушения (рис. 5в)).

При определении динамического предела текучести $\sigma_{\tau_{d}}$ примем во внимание выводы, изложенные в [8, 9]. Авторы этих работ отмечают, что при ударном растяжении материалов, нагретых до температуры штамповки, динамический предел текучести $\sigma_{\tau_{d}}$ достаточно близок к динамическому пределу прочности $\sigma_{в_{d}}$ и при испытаниях практически не выявляется. Учитывая сказанное, при определении величины $\sigma_{\tau_{d}}$ будем исходить из условия, что $\sigma_{\tau_{d}} = \sigma_{в_{d}}$, т. е., устанавливая по (2) величину $\sigma_{в_{d}}$, считаем, что полученные результаты без большой погрешности можно использовать для определения динамического предела текучести $\sigma_{\tau_{d}}$ исследуемых материалов.

Наряду с определением механических свойств, важное значение придается и установлению скорости деформации є́, при которой проводились испытания. Для нахождения среднего значения скорости деформации є́ в процессе растяжения стержневой части используем известную зависимость [2]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t_{\text{pa3}}},\tag{3}$$

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

Значение степени деформации є в (3) рассчитывается как и при обычных испытаниях на одноосное растяжение [10], т. е.

$$\varepsilon = \frac{\Psi}{1 - \Psi},\tag{4}$$

где ψ – относительное сужение поперечного сечения. Величина ψ в (4) определяется по зависимости

$$\Psi = \frac{F_{\rm cr} - F_{\rm m}}{F_{\rm cr}},\tag{5}$$

где $F_{cr} = \pi d^2_{cr}/4 - площадь стержневой части в сечении 1–1; <math>F_{u} = \pi d^2_{u}/4 -$ то же шейки в сечении 3–3 по месту ее наибольшего утонения или разрушения (рис. 5в).

По рассмотренной методике были проведены динамические испытания ряда материалов (штамповые, инструментальные стали 5ХНМ, У10, 5X3B3MΦC, конструкционная сталь 1Х18Н10Т) при различных значениях начальной температуры нагрева Т₀. Для испытаний использовались цилиндрические образцы 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 табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний материалов на динамическое растяжение под действием инерционной нагрузки

Испытуемый материал	Тем- пера- тура нагре- ва <i>T</i> ₀ ,°С	Началь- ная ско- рость удара V ₀ , м/с	Скорость деформа- ции έ, с ⁻¹	Динами- ческий предел прочно- сти о _{вд} , МПа	Посто- янная пластич- ности <i>k</i> , МПа
5Х3ВЗМФС	1150	143	12400	261	151
5XHM	860	143	18600	283	164
У10	820	143	21700	302	175
1X18H10T	1180	143	870	258	148

Значения постоянной пластичности *k* в приведенной таблице определялись по условию Губера–Мизеса [10]

$$k = \frac{\sigma_{\tau_{\mathcal{A}}}}{\sqrt{3}},\tag{6}$$

где отд – динамический предел текучести.

При расчетах постоянной пластичности k, принимая во внимание отмеченные выше результаты работ [8, 9], в (6) вместо динамического предела текучести σ_{TA} подставляли значения динамического предела прочности σ_{BA} , найденные с использованием (2).

Приведенные в табл. 1 данные имеют существенное значение для прогнозирования ряда параметров, которые необходимо учитывать 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; 820; 1150 °С [11].

Оценивая приведенные в табл. 1 результаты для стали 1X18H10T, следует отметить, что они вполне согласуются с результатами [12], полученными для этого материала ($\sigma_{\rm вд}$ = 250 МПа; $\dot{\varepsilon} = 890 \text{ c}^{-1}$; T = 1180 °C) при испытаниях по схеме скоростной осадки образцов. Указанное соответствие результатов, достигнутое при использовании различных схем нагружения, показывает, что разработанная на основе способа [6] методика динамических испытаний является достаточно корректной (степень расхождения значений овл, 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.

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 способ динамических испытаний материалов.

3. Для регистрации инерционной нагрузки разработана измерительная схема, позволяющая определять ускорение стержневой части в заданные моменты времени (момент шейкообразования или разрушения стержневой части).

4. По разработанному способу для ряда материалов (5ХНМ, У10, 5ХЗВЗМФС, 1Х18Н10Т) проведены испытания на одноосное растяжение и установлены значения динамических показателей прочности σ_{pd} , σ_{bd} , σ_{τ_d} и постоянной пластичности k.

5. На основании проведенных экспериментов установлены достаточно высокая корректность, сравнительная простота и низкая трудоемкость нового способа 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. Исаевич Л. А., Качанов И. В. Новые технологии изготовления стержневого инструмента с упрочненной рабочей поверхностью // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Мин. обр. РБ, НАН РБ, Мог. маш. ин-т. – Могилев, 2000. – С. 72.

2. Агеев И. П., Каратушин С. И. Механические испытания металлов при высоких температурах и кратковременном нагружении. – М.: Металлургия, 1969. – 280 с.

3. Волошенко-Климовицкий Ю. Я. Динамический предел текучести. – М.: Наука, 1965. – 179 с.

4. Некоторые вопросы методики динамического растяжения металлов / В. И. Беляев, В. И. Зинкевич, В. Н. Ковалевский, П. Н. Скоков // Новая техника и прогрессивная технология. – Мн.: Выш. шк., 1969. – С. 311–313.

5. Высокоскоростное, малоотходное деформирование металлов в штампах / Под ред. В. Г. Кононенко. – Харьков: Выща шк., 1985. – 176 с.

6. А. с. 1108348 (СССР). Способ динамических испытаний материалов / М. В. Степашко, М. А. Барановский, И. В. Качанов (СССР) // Бюл. изобр. – 1984. – № 30.

7. Исаевич Л. А., Качанов И. В., Кондратюк В. Ф. Экспресс-метод динамических испытаний материалов на одноосное растяжение // Инженер-механик. – 2002. – № 2 (15). – С. 9–12.

8. Жученко А. Н. Влияние сил инерции на процесс высокоскоростного выдавливания поковок // Высокоскоростная объемная штамповка. – М.: Машиностроение, 1969. – С. 59–84.

9. Определение механических характеристик инструментальных сталей при температурах 400-700 °С в диапазоне скоростей деформирования 1-20 м/с: Отчет по НИР (заключит.) / ЭНИИМАШ; Рук. Е. К. Почтенный. – № ГР 69001815. – Мн., 1970. – 60 с.

10. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 1977. – 423 с.

11. Фетисов Г. П., Карпман М. Г. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высш. шк., 2001. – 495 с.

12. Жученко А. Н. Исследование прессования поковок с учетом действия сил инерции: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1970. – 21 с.