

ЗАДАНИЕ СВОЙСТВ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИМПУЛЬСНОЙ РЕЗКИ НЕПРЕРЫВНЫХ СЛИТКОВ

Непрерывная разливка сталей – прогрессивный способ получения слитков-заготовок (полуфабрикатов – блюма, сляба, сортовых заготовок), имеющий множество технических и экономических преимуществ и находящий все большее применение в промышленности [1]. Полученные полуфабрикаты подвергаются дальнейшей обработке (прокатке) для получения требуемых свойств (плотности, прочности и др.) и могут быть использованы для изготовления деталей общего машиностроения, а также деталей авиационной и ракетно-космической техники.

В качестве эффективного метода резки непрерывных слитков на заготовки мерной длины может быть применена импульсная (высокоскоростная) резка, разработанная в Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» [1–3].

В численных (приближенных) расчетах методом конечных элементов (МКЭ) достаточно часто при рассмотрении процессов деформирования металлов зависимость напряжений в растянутом образце от степени деформации (диаграмму σ – ε образца) принимают в виде ломаной линии (рис. 1). Угол наклона отрезка в упругой зоне зависит от модуля упругости материала E , в пластической зоне наклон определяется модулем упрочнения P . Такую аппроксимированную диаграмму растяжения металла позволяют математически описать уравнения (1):

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon, & \sigma &\leq \sigma_{\text{пц}}(\sigma_s), \\ \sigma &= \sigma_s + P\varepsilon, & \sigma &> \sigma_{\text{пц}}(\sigma_s). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Математическое описание (1) диаграммы σ – ε обладает рядом преимуществ, в частности простотой задания закона упрочнения. Для многих материалов величина модуля упрочнения P является справочной величиной (например, $P = 770$ МПа для стали Ст.3, $P = 1180$ МПа для стали 1Х18Н9Т). Во многих случаях билинейный закон позволяет адекватно аппроксимировать реальные диаграммы растяжения (диаграммы условных напряжений) металла (рис. 2) и получать точные, соответствующие опытным данным, результаты расчета. На рис. 2 «зуб текучести», имеющий место на кривой 1 в зоне, где $\sigma \approx \sigma_s$, условно не показан.

Однако для ряда задач, в частности для процессов высокоскоростного (импульсного) деформирования горячего металла, необходимо одновременно учитывать зависимость свойств металла от температуры, особенности скоростного упрочнения и пр. Для таких задач билинейный закон малоприменим, так как он может внести достаточно большие по-

грешности в вычислениях, и адекватные результаты расчета в таком случае получить сложно.

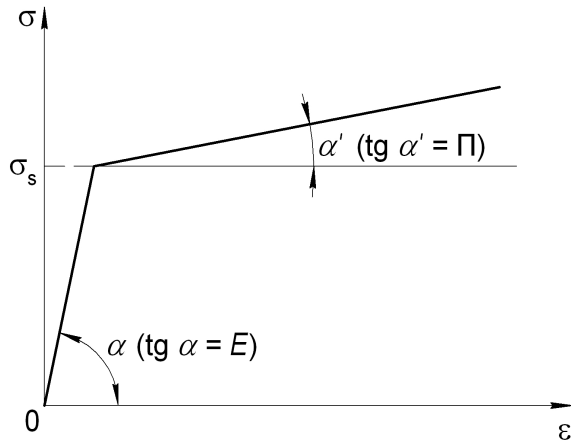


Рисунок 1 – Диаграмма σ – ε (билинейный закон)

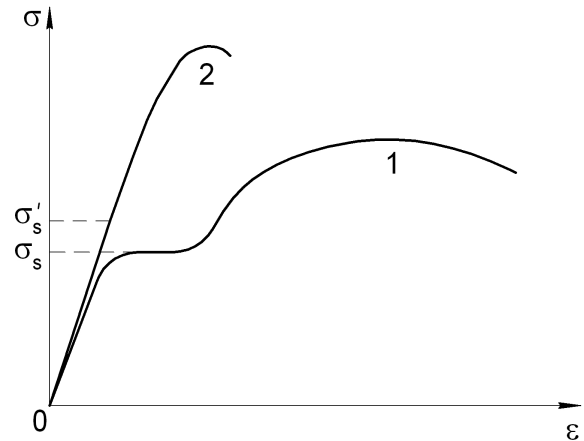


Рисунок 2 – Диаграммы σ – ε :
1 – малоуглеродистые стали;
2 – цветные металлы, легированные стали и др.

В частности, необходимо, чтобы в процессе математического моделирования методом конечных элементов рассматриваемый металл принимался не идеально пластическим, а способным к кинематическому упрочнению, в частности в соответствии с законом

$$\sigma_{дин} = k_v \sigma_{ст}, \quad (2)$$

где k_v – коэффициент динамичности (коэффициент k_v определен в ХАИ для ряда материалов при различных скоростях деформирования металла в зависимости от температуры) [4];

$\sigma_{дин}, \sigma_{ст}$ – соответственно напряжения при динамическом и статическом нагружениях.

Коэффициент динамичности по усилию k_{vp} зависит от марки материала, начальной скорости деформирования и температуры заготовки (рис. 3) [4].

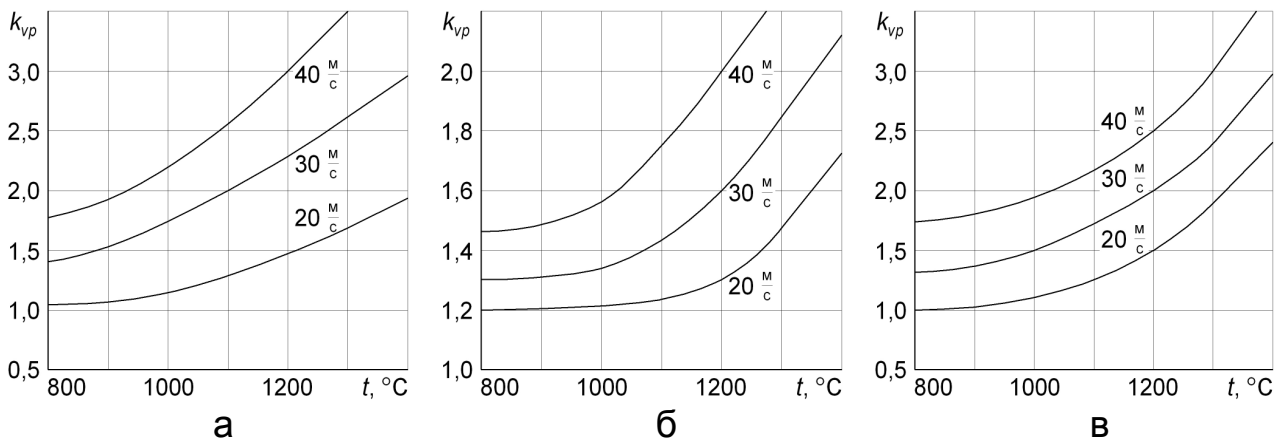


Рисунок 3 – Зависимость $k_{vp} = f(t)$ при различных скоростях деформирования:
а – сталь 50; б – сталь 20X; в – сталь 30XH2MФА

Рассмотрим способы задания свойств материала в ряде систем, реализующих МКЭ. В системе *LS-DYNA* свойства материала задают путем определения модели материала. Для каждой модели необходимо задать набор констант, число которых определяется типом модели, который, в свою очередь, зависит от вида проводимого расчета. Каждая из моделей материалов, предлагаемых системой FE-анализа, оптимизирована под определенный тип расчетов. Наиболее простые модели учитывают лишь упругое деформирование, более сложные – упругопластическое деформирование, деформационное упрочнение металла и разрушение. Для задач высокоскоростной резки горячего металла необходимо, чтобы выбранная в качестве базовой модель учитывала упругопластическое деформирование с наличием больших пластических деформаций, изменение свойств металла в зависимости от температуры, скоростное упрочнение и разрушение.

В качестве примера такой модели материала можно привести модель Джонсона–Кука, для которой [5, 6]

$$y_s = \left(A + B e^{-p_n} \right) (1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}), \quad (3)$$

где A, B, c, n, m – коэффициенты, характеризующие свойства деформируемого материала;

\bar{e}^p – величина пластической деформации;

$\dot{\epsilon}^* = \frac{\bar{e}^p}{\dot{e}_0}$ – скорость пластической деформации;

$T^* = \frac{T - T_{\text{комн}}}{T_{\text{плавл}} - T_{\text{комн}}}$ – гомологическая температура (определяется, в

частности, температурой плавления деформируемого металла).

Зависимость $y_s = f(\bar{e}^p)$ – нелинейная; для нахождения y_{si} в этой модели материала вместо итерационного расчета используется ряд Тейлора.

Деформация, соответствующая разрушению материала, определяется формулой

$$\epsilon^f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 + D_5 T^*), \quad (4)$$

где $\sigma^* = \frac{p}{\sigma_0}$ – отношение действующего на контактную поверхность конечного элемента давления к вызванному им напряжению;

D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – коэффициенты материала.

В модели Джонсона–Кука разрушение материала происходит, когда параметр разрушения $D = \sum \frac{D e^{\bar{e}^p}}{e^f}$ становится равным единице.

Наряду с другими параметрами для модели Джонсона–Кука необходимо задать плотность материала, модуль сдвига, удельную теплоемкость.

Для ряда моделей материала необходимо также задавать параметры уравнения состояния металла (например, в случае, если плотность материала изменяется в процессе деформирования) по одному из типов. Для линейного полиномиального уравнения состояния давление определяется выражением

$$\left. \begin{aligned} \rho &= C_0 + C_1 M + C_2 M^2 + C_3 M^3 + (C_4 + C_5 M + C_6 M^2); \\ M &= \frac{C}{C_0} - 1, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где C_0, \dots, C_6 – константы материала;

μ – параметр, характеризующий отношение текущей плотности к начальной.

Следует отметить, что изображенная на рис. 1 билинейная диаграмма σ – ε также представляет собой модель материала.

В ряде МКЭ-систем (*Abaqus* и др.) имеется возможность задавать свойства материала в диалоговом режиме (рис. 4), фактически определяя модель материала, но в виде, более приближенном к заданию набора диаграмм σ – ε как кривых, зависящих от температуры, скорости деформирования и др.

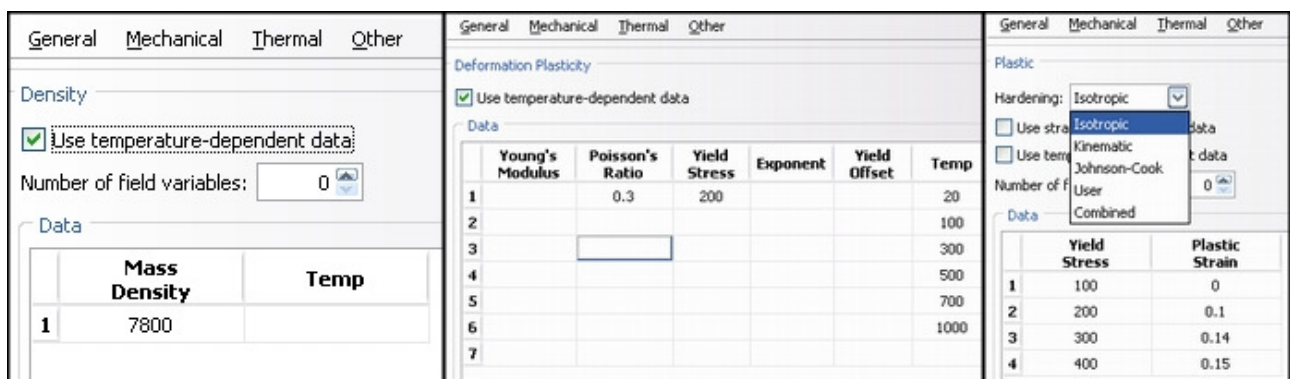


Рисунок 4 – Задание свойств материала в системе *Abaqus*

Становится очевидным, что для математического моделирования процессов импульсного механического взаимодействия между режущим инструментом и горячей заготовкой для рассматриваемой номенклатуры материалов необходимо иметь максимально полную, насколько это возможно, информацию о свойствах металла в рассматриваемом диапазоне температур (соответствующем температуре разделяемого слитка в различных его точках), закон упрочнения металла при различных температурах и др., то есть иметь максимально полный набор диаграмм σ – ε , реально описывающих поведение исследуемого металла под нагрузкой. В таком случае результаты, получаемые с применением МКЭ, будут адекватными и точными, так как модель материала не будет вносить в расчеты дополнительной погрешности.

Выводы

1. Проанализированы основные способы задания свойств материала при решении задач деформирования металла методом конечных элементов.

2. Установлено, что билинейный закон, аппроксимирующий диаграмму растяжения металла, малоприменим для математического моделирования процессов высокоскоростной резки непрерывных слитков, так как для подобных задач требуется более точное задание свойств деформируемого металла в зависимости от температуры, скорости деформирования и др.

3. Выбран наиболее оптимальный способ задания модели материала, реализованный в системе *Abaqus*. Такой подход (задание свойств в диалоговом режиме в виде набора таблиц) отличается простотой, однако требует наличия точных данных по свойствам исследуемых материалов.

4. Необходимо проведение дальнейших опытных работ по установлению свойств металлов при различных температурах и скоростях деформирования. Полученная база данных свойств деформируемых материалов позволит проводить точные численные эксперименты, сокращая при этом общие затраты на исследования.

Список использованных источников

1. Планковский С. И. Перспективы применения импульсной резки в машинах непрерывного литья заготовок / С. И. Планковский, С. А. Мазниченко, Е. Е. Хитрых // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 43(4). – Х., 2005. – С. 85–91.

2. Khytrykh E. Finite element analysis of impulse cutting processes / E. Khytrykh // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2007. – Спец. выпуск «Новые технологии в машиностроении». – С. 28–33.

3. Импульсная резка горячего металла / В. С. Кривцов, А. Ю. Боташев, А. Н. Застела и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2005. – 476 с.

4. Мельник В. К. Исследование и внедрение импульсной резки металла пластиной-ножом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05. – Х., 1966. – 186 с.

5. LS-DYNA Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation. – 1998. – 498 p.

6. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Presented at the Seventh International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, April 1983.

Поступила в редакцию 04.06.2010 г.

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. Н.И. Семишов,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*