

ности металлической структуры и механизмы ее разрушения и соединения при тепловом и механическом воздействии // ИФЖ. 2002. Т.75. №1. С. 148–155. 6. Мрочек Ж.А., Харченко В.В. Особенности технологического процесса формообразования покрытий прессованием // Машиностроение. – Мн. 2009. – Вып. 24. С. 23–28. 7. Мотт Н., Месси Г. Теория атомных столкновений. М.: Мир, 1969. 756 с.

УДК 621.9.91 (035)

Присевок А.Ф., Клавсуть П.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУЖКИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

С интенсивным развитием производственных технологий за последние годы, высокоскоростная механическая обработка (ВСО) нашла широкое применение в различных отраслях промышленности. ВСО обеспечивает высокую эффективность и низкую стоимость наряду с повышением качества обработки, позволяет обрабатывать труднообрабатываемые материалы с высокой твердостью (закаленная легированная сталь). Технология ВСО нашла широкое применение в аэрокосмической промышленности, машиностроении и инструментально-штамповом производстве.

Одним из отличий высокоскоростной обработки от обычной механической является образование заостренной “пилообразной” стружки [1], существенно влияющей на такие параметры процесса, как сила резания [2], температура в зоне резания [3], износ режущего инструмента [4] и качество обработанной поверхности [5]. Для возможности оптимизации ВСО необходимо установить закономерности влияния процесса стружкообразования на параметры обработки.

Одним из способов исследования процесса стружкообразования является теоретическое моделирование методом конечных элементов [6, 7]. ВСО относится к нелинейным многокритериальным процессам, существующие математические модели не учитывают в полной мере состояние материала в условиях интенсивного деформирования. Например, результаты конечно-элементного моделирования, выполненного с использованием программного обеспечения Deform-2D, не всегда согласуются с экспериментальными данными из-за невозможности обработки нелинейных задач. В данном исследовании для моделирования процесса стружкообразования при ВСО используется модель материала и критерии разрушения, основанные на уравнении Джонсона-Кука. Математическое моделирование методом конечных элементов осуществлено на базе программного обеспечения ABAQUS, позволяющего обрабатывать нелинейные многокритериальные задачи.

Моделирование процесса стружкообразования

1. Модель состояния материала

Для моделирования процесса стружкообразования и возникающих сил резания используется математическая модель состояния материала Джонсона-Кука. Эта модель учитывает влияние напряжения, деформации, скорости деформации и температуры [8, 9], что соответствует задачам, в которых скорость деформации изменяется в широком диапазоне (от 10^2 с^{-1} до 10^6 с^{-1}), а изменение температуры приводит к изменению условий пластической деформации. Эта модель описывается следующим уравнением кривой течения (уравнение состояния):

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\epsilon})^n \right] \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right], \quad (1)$$

где, $\bar{\sigma}$ – эквивалентное напряжение;
 $\bar{\epsilon}$ – эквивалентная пластическая деформация;
 $\dot{\bar{\epsilon}}$ – скорость деформации;
 $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ – начальная скорость деформации;
 T_0 – температура окружающей среды;
 T_{melt} – температур плавления материала;
 A – предел текучести;
 B – коэффициент, учитывающий твердость материала;
 n – показатель степени упрочнения;
 C – коэффициент, зависящий от скорости деформации;
 m – коэффициент влияния температуры.

Данные для уравнения Джонсона-Кука, используемые при создании модели заготовки, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные для уравнения Джонсона-Кука

A, МПа	B, МПа	n	C	m	$\dot{\bar{\epsilon}}_0, c^{-1}$	T_{melt}, C°	T_0, C°
553	600	0,234	0,013	1,0	0,001	1460	20

Коэффициенты для уравнения Джонсона-Кука определены при испытаниях на разрыв бруса Хопкинсона при высокоскоростной деформации. Процесс высокоскоростной деформации полностью соответствует деформации материала в зоне основного сдвига при ВСО. Это обуславливает использование уравнения Джонсона-Кука при моделировании процесса стружкообразования и сил резания при высокоскоростной обработке.

2. Критерии формирования стружки

При моделировании процесса образования стружки на базе программного обеспечения ABAQUS/Explicit используется уравнение Джонсона-Кука, соответствующее высокоскоростной деформации металла. Модель динамического разрушения материала Джонсона-Кука основывается на значении эквивалентных пластических деформаций в кристаллической решетке. Считается, что разрушение происходит, когда значение параметра D превышает 1. Параметр разрушения D определяется следующим образом:

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \right) \quad (2)$$

где, $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ – изменение эквивалентной пластической деформации;
 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ – деформация разрушения.

Предполагается, что деформация разрушения $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ зависит от коэффициента пластической деформации $\bar{\epsilon}^{pl} / \dot{\bar{\epsilon}}_0$, коэффициента напряжения p/q и коэффициента температуры $Q = (T - T_0) / (T_{melt} - T_0)$. Величина $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ определяется следующим образом:

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right) \right] \cdot \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\bar{\epsilon}^{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \right] \cdot \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0}\right) \right] \quad (3)$$

где, $d_1 - d_5$ коэффициенты разрушения, определенные при температуре T ;

$\dot{\varepsilon}_0$ – начальная скорость деформации.

Значения величин $d_1 - d_5$ для модели динамического разрушения по уравнению Джонсона-Кука сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов уравнения Джонсона-Кука для моделируемого материала

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0,06	3,31	-1,96	0,0018	0,58

3. Трение в модели

При создании модели трение учитываем по закону Кулона:

$$\begin{cases} \tau_f = \mu\sigma_n & \mu\sigma_n < \bar{\tau}_s \\ \tau_f = \bar{\tau}_s & \mu\sigma_n \geq \bar{\tau}_s \end{cases} \quad (4)$$

где, τ_f – напряжение с учетом трения;

μ – коэффициент трения;

σ_n – нормальное напряжение;

$\bar{\tau}_s$ – предельное касательное напряжение.

В модели взаимодействия стружки и режущего инструмента коэффициент трения принимался 0,27 при взаимном перемещении, и 1 – при отсутствии перемещения [10]. При моделировании программное обеспечение учитывает действительные контактные напряжения и выбирает соответствующую модель трения.

4. Моделирование высокоскоростной обработки методом конечных элементов

Сетка конечных элементов модели заготовки построена из 80*12 плоских четырехвершинных элементов (CPE4R). Сетка инструмента – из 58*25 элементов, передний угол -10°. Моделирование и экспериментальная обработка выполнены при одинаковых условиях.

Экспериментальная высокоскоростная обработка

Материал заготовки – сталь. Твердость HRC 45 обеспечена закалкой до температуры 850 С° в течении 70 минут и отпуском при температуре 430 С° в течении 5 часов. Обработка велась на станке СА6140 твердосплавным инструментом (YT15) без охлаждения, скорость резания – 433 м/мин, глубина резания – 0,2 мм. Передний угол -10°, 0° и 10°. Сила резания измерялась динамометром YDX- 9702.

Полученные в процессе обработки образцы стружки были помещены в смесь эпоксидной смолы и затвердителя. После шлифовки и полировки образцы исследовались на оптическом микроскопе Neuphot.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальной обработки

Сравнение результатов моделирования и экспериментальной обработки с разным значением переднего угла режущего инструмента представлены на рис. 1, 2 и 3.

Из рис. видно, что значение переднего угла существенным образом влияет на вид образующейся стружки. Особенно четко выражено образование пилообразной стружки при отрицательном значении переднего угла. Степень заострения G_s и шаг между вершинами заострений характеризуют вид образующейся стружки [10,11]. Степень заострения G_s определяется:

$$G_s = (H - h) / H. \quad (5)$$

Зависимость степени заострения G_s и шага между вершинами P от значения переднего угла представлены на рис. 4 и 5.

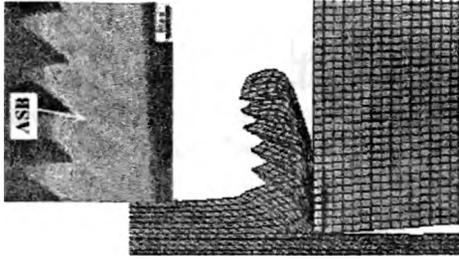


Рис. 1. Образцы стружки, полученные при экспериментальной обработке и при моделировании методом конечных элементов (передний угол -10°)

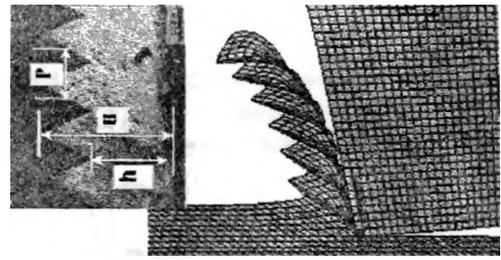


Рис. 2. Образцы стружки, полученные при экспериментальной обработке и при моделировании методом конечных элементов (передний угол 0°)

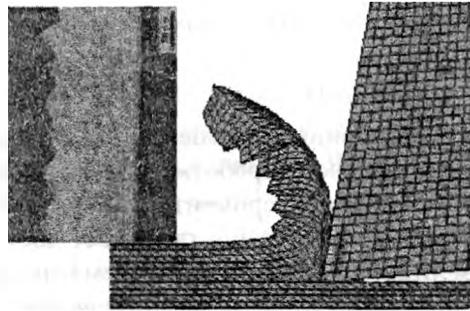


Рис. 3. Образцы стружки, полученные при экспериментальной обработке и при моделировании методом конечных элементов (передний угол 10°)

На рис. 4, 5 и 6 показана зависимость силы резания от переднего угла: с увеличением значения переднего угла сила резания уменьшается. Сила резания увеличивается с момента начала контакта режущего инструмента и заготовки и при достижении максимального значения переходит в режим периодических колебаний. Установлено, что частота и амплитуда колебания силы резания связана со степенью заострения стружки: с увеличением амплитуды колебания силы резания степень заострения увеличивается.

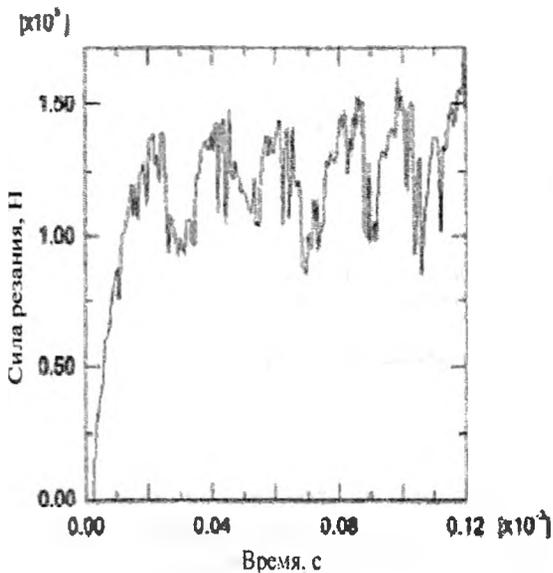


Рис. 4. График изменения силы резания, передний угол -10°

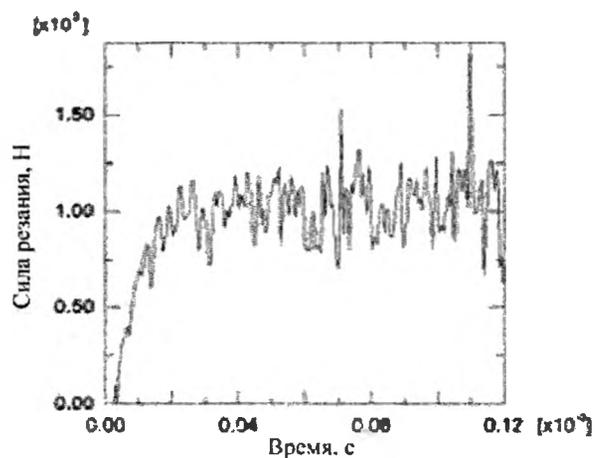


Рис. 5. График изменения силы резания, передний угол 0°

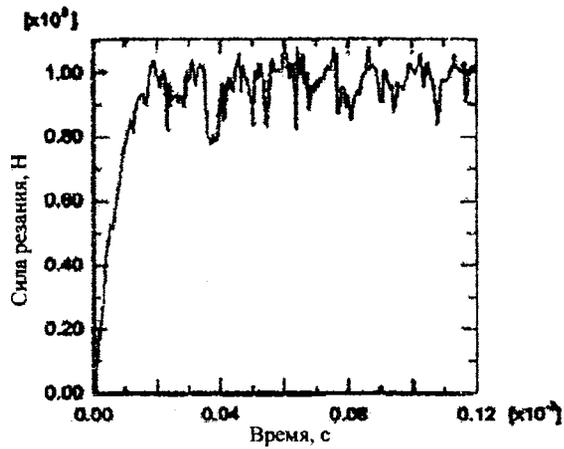


Рис. 6. График изменения силы резания, передний угол 10°

На рис. 7 представлены усредненные изменения силы резания в зависимости от значения переднего угла при экспериментальной обработке и при моделировании. Из графика видно, что значения силы резания, полученные экспериментальным путем, практически соответствует данным, полученным при моделировании, что подтверждает достоверность данных моделирования методом конечных элементов. Использование математической модели позволяет оптимизировать высокоскоростную механическую обработку за счет изменения различных параметров резания.

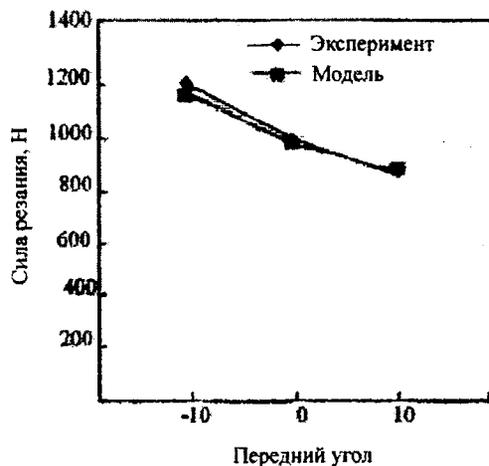


Рис. 7. График зависимости усредненного значения силы резания от значения переднего угла при экспериментальной обработке и при моделировании методом конечных элементов

Заключение

Цель данной работы заключалась в создании математической модели процесса образования стружки при высокоскоростной механической обработке закаленной стали. Модель создана на базе программного обеспечения ABAQUS, использующего уравнение состояния материала Джонсона-Кука. Моделирование процесса образования стружки производилось с учетом высокоскоростной деформации. Влияние изменения переднего угла на образование стружки и

силу резания определялось при экспериментальной обработке. Результаты моделирования достаточно точно повторяли результаты экспериментальной обработки. Установлено, что при высокоскоростной обработке закаленной стали образуется заостренная “пилообразная” стружка. С уменьшением переднего угла степень заострения стружки, шаг вершин заострений и сила резания увеличиваются. Разработанная математическая модель может использоваться для оптимизации высокоскоростной механической обработки закаленной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. C.Z. Duan, T. Dou, Y.J. Cai, Y.Y. Li. Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation Process during High Speed Machining of AISI 1045 Hardened Steel. International Journal of Recent Trends in Engineering, vol. 1 (5), pp. 46-50, 2009. 2. G. Sutter, A. Molinari. Analysis of the cutting force components and friction in high speed machining. J. Manuf. Sci. Eng. vol.127, pp. 245-250, 2005. 3. G. Sutter, N. Ranc. Temperature fields in a chip during high-speed orthogonal cutting- An experimental investigation. Inter. J. Machine Tools Manuf. vol.47, pp.1507-1517, 2007. 4. Z.N. Farhat. Wear mechanism of CBN cutting tool during high-speed machining of mold steel. Mater. Sci. Eng. vol.A361, pp.100-110, 2003. 5. T.I. El-Wardany, H.A. Kishawy, and M.A. Elbestawi. Surface integrity of die material in high speed hard machining, Part I: micrographical analysis. J. Manuf. Sci. Eng. vol. 122, pp.620-631, 2000. 6. Sung-Han Rhim, Soo-Ik Oh. Prediction of serrated chip formation in metal cutting process with new flow stress model for AISI 1045 steel. J. Mater. Process. Technol. vol.171, pp.417-422, 2006. 7. T.J.Burns, M.A.Davies. On repeated adiabatic shear band formation during high-speed machining. Inter. J. Plasticity, vol.18, pp.487-506, 2002. 8. T.Mabrouki, J.-F.Rigal. A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning. J. Mater. Process. Technol. vol.176, pp.214-221,2006. 9. F.Klocke, H.-W.Raedt, and S.Hoppe. 2D-FEM simulation of the orthogonal high speed cutting process. Machining Science and Technology, vol. 5 (3), pp.323-340,2001. 10. M.A.Davies, A.L.Cooke, and E.R.Larsen. High Bandwidth Thermal Microscopy of machining AISI 1045 Steel. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 54 (1), pp.63-66, 2005. 11. M.A.Davies, Q.Cao, and A.L.Cooks et al. On the measurement and prediction of temperature fields in machining AISI 1045 Steel. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 52 (1), pp. 77-80, 2003.

УДК621.762.4.539

Хмелев А.А., Галуза И.М

ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛИ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Метод измерения твердости является незаменимым при оценке механических свойств металлов в процессе эксплуатации, при текущем контроле состояния конструкций и при аварийных исследованиях. Результатом исследования в большинстве случаев является определение прочностных характеристик металла, в том числе и значений ударной вязкости. К указанным результатам следует добавить возможность оценки пластичности эксплуатируемых конструкций путем определения уровня накопленной пластической деформации и уровня оставшегося запаса пластичности.

Особенно это важно для выявления и оценки состояния локально деформированных зон конструкций, имеющих повышенную твердость по сравнению с твердостью исходного металла. Такие зоны являются источниками возникновения и развития трещин. Они создаются технологическими методами обработки металлов типа холодной гибки и сварки. В этих зонах распределение твердости имеет пиковый характер, где максимальное значение твердости соответствует вершине пика. Ширина пика порой составляет 1÷2 мм.