

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вступление. Композиционные материалы (КМ) находят все более широкое применение в различных областях техники. Существует большое многообразие видов и типов КМ универсального и специального применения. К первым относят классические КМ армированные длинными волокнами или жгутами, ко вторым – КМ с металлической матрицей и керамическим связующим. В практике механической обработки КМ отличаются твердостью и имеют высокие абразивные свойства. Эти, и некоторые другие качества [1], приводят к наличию серьезных трудностей при обработке, которые в основном сводятся к сильному изнашиванию режущего инструмента и низкой точности обработки. Эти обстоятельства приводят к существенным энергетическим затратам на полную обработку детали и, как следствие, к высокой стоимости обработки. Кроме того, присутствие мелкодисперсной стружки при обработке, требует организации мер по экологической безопасности и утилизации продуктов разрушения. Все это приводит к удорожанию технологических операций и использованию дополнительной энергии на обработку.

Состояние проблемы и формулировка задачи. Присутствие в КМ материалов с резко отличающимися механическими свойствами при обработке, например, резанием приводит к нарушению фактической целостности обрабатываемой поверхности. Имеет место появление шероховатости, которую трудно контролировать, остаточных напряжений и повреждений материала на некоторой глубине, вызванных ростом трещин различной длины и ориентации. В связи с этим в последнее десятилетие проблемы, связанные с точностью и эффективностью резания КМ обрели особую актуальность также с точки зрения себестоимости обработки, которая связана с износом инструмента, выбором параметров обработки и осуществлением контроля качества обработанной поверхности.

Обсуждению теоретических вопросов и инженерных проблем посвящены работы [2,3], где исследованы процессы обработки резанием КМ армированных длинными волокнами. Главный вывод, который был сделан авторами, состоит в том, что степень разрушения обработанной поверхности и обрабатываемость КМ определяется в основном ориентацией волокон по отношению к направлению резания. Также в работе [4] были рассмотрены вопросы влияния геометрии режущего инструмента и ориентации волокон. Достаточно большие усилия исследователей были уделены прогнозированию величины силы резания [5,6], где был использован энергетический подход для ортогонального резания. Кроме сугубо аналитических и экспериментальных методов активно применялись численные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ) [7,8]. Были проведены расчеты по усредненной модели и рассмотрено резание отдельных волокон как разрушение волокна при взаимодействии с инструментом.

Постановка задачи и цель работы. Как было обобщено в [9] все методы изучения механической обработки КМ в целом можно разделить на три категории: экспериментальные, в основном изучающие макро- и микрообрабатываемость композитов; методы, основанные на принципах механики резания и направленные на создание простых инженерных моделей и численные методы моделирования, которые рассматривают модели резания КМ как анизотропные макроматериалы или исследуют контактное взаимодействие матрицы и инструмента. Фактически, методы, работающие на макроуровне, в большинстве случаев игнорируют основные характеристики композитов. Методы микроуровня не дают возможности интегрировать какие-либо инженерные и практические формулы. Поэтому по-прежнему остается актуальным вопрос объединения и совместного использования имеющихся достижений на макро- и микроуровне и создания простых инженерных решений для промышленного применения. Главной целью настоящей работы является попытка обобщения некоторых моделей резания композитов для предсказания сил резания и изнашивания вершины режущего инструмента.

Теоретические положения. Наиболее важной и наименее предсказуемой величиной является сила резания, которая определяет не только качество обработанной поверхности и величину изнашивания режущего инструмента, но и общие прямые затраты энергии на обработку и косвенные затраты, связанные с последующей обработкой или доводкой поверхности детали. В литературе имеется множество публикаций посвященных экспериментальному изучению сил резания [1,4,9,10]. Эти исследования еще раз показали, что главную роль при обработке композитов играет ориентация направления движения инструмента и армирующих волокон. Их взаимно перпендикулярное положение является предельным, за которым при обработке резко ухудшается качество обработки, и возникают тяжелые повреждения поверхности. При резании композитов армированных длинными волокнами или жгутами (рис. 1) принято различать три зоны деформации. Зона разрушения перед передней поверхностью режущего клина инст-

румента, превращающаяся в стружку, происходит в двух взаимно перпендикулярных направлениях – поперек волокон и вдоль них. Непосредственно впереди острия вершины инструмента происходит контактное разрушение материала. Эту зону обычно называют зоной сжатия. Третья зона, определяется упругим отжатием инструмента, и она располагается под задней поверхностью режущего инструмента.

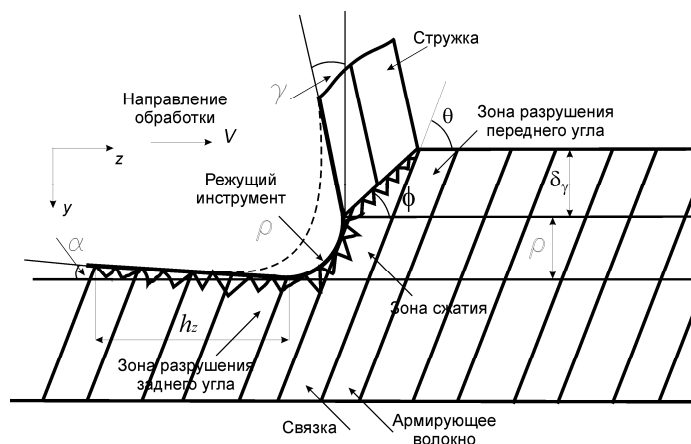


Рисунок 1 – К определению силы резания и зон разрушения

Наибольший интерес представляет определение силы, действующей по задней поверхности инструмента. Эта сила ответственна за интенсивность и величину износа инструмента и, как следствие, за качество обработанной поверхности. При резании композитов в качестве критерия износостойкости принимают технологический критерий – величину износа по задней поверхности [11]. Для вычисления силы, действующей по задней поверхности, воспользуемся аналитическим выражением для составляющих силы резания, полученным в [12]. Составляющие силы резания вдоль оси z и y вычисляются как сумма сил, возникающих в каждой из трех зон разрушения, как описано выше

$$\begin{aligned} F_y &= F_{ych} + F_{yst} + F_{yback}; \\ F_z &= F_{zch} + F_{zst} + F_{zback}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} F_{ych} &= \tau_1 \cdot h \cdot \delta_\gamma \frac{\sin \phi \cdot \tan(\phi + \beta - \gamma) + \cos \phi}{(\tau_1 / \tau_2) \cos(\theta - \phi) \sin \theta - \sin(\theta - \phi) \cos \theta}, \\ F_{zch} &= \tau_1 \cdot h \cdot \delta_\gamma \frac{\cos \phi \cdot \tan(\phi + \beta - \gamma) - \sin \phi}{(\tau_1 / \tau_2) \cos(\theta - \phi) \sin \theta - \sin(\theta - \phi) \cos \theta}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_{yst} &= K \cdot P \cdot (\cos \theta - \mu \cdot \sin \theta), \\ F_{zst} &= K \cdot P \cdot (\sin \theta - \mu \cdot \cos \theta), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_{yback} &= 0,5 \cdot \rho \cdot E_z \cdot h \cdot (1 - \mu \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha), \\ F_{zback} &= 0,5 \cdot \rho \cdot E_z \cdot h \cdot \cos^2 \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Значения входящих в выражения (2)–(4) величин следующие: τ_1, τ_2 – значение сил среза в направлениях, МПа; h – ширина среза, м; δ_γ – величина зоны разрушения переднего угла, м; γ – передний угол; $\phi = \arctan[\cos \gamma / (1 - \sin \gamma)]$; α – задний угол; β – угол трения для передней поверхности вершины инструмента; θ – угол ориентации волокон или жгутов в КМ; K – коэффициент, зависящий от ориентации волокон в КМ, определяемый экспериментально; μ – коэффициент трения; ρ – радиус закругления

вершины режущего инструмента, м; E_z – модуль упругости материала в зоне разрушения заднего угла, Па.

С другой стороны известное соотношение из работы [1] для составляющих силы резания имеет вид:

$$\begin{aligned} F_y &= N_\gamma \cdot \cos \gamma + F_\gamma \cdot \sin \gamma + F_\alpha; \\ F_z &= F_\gamma \cdot \cos \gamma - N_\gamma \cdot \sin \gamma + N_\alpha, \end{aligned} \quad (5)$$

где N_γ , N_α – нормальные силы на передней и задней поверхности, Па; F_γ , F_α – силы трения передней и задней поверхности, Па. Значения этих сил определяются в [1] через нормальные и касательные напряжения с учетом ширины среза и длины контакта по передней поверхности.

Заметим, что в выражениях (1)–(4) фигурирует угол ориентации волокон армирующего материала композита, но отсутствует длина контакта по передней и задней поверхности. С другой стороны в (5) отсутствует какое-либо участие угла ориентации волокон при вычислении составляющих силы резания.

Результаты и обсуждения. Рассмотрим решение по каждой из методик и их согласование с экспериментальными данными, приведенными в [12] для композитов с различной ориентацией волокон. В качестве исходных данных примем: $\tau_1=90$ МПа; $\tau_2=20$ МПа; $\beta=30^\circ$; $E_z=10$ ГПа; $\mu=0,026$; $K=\arctan(30/\theta)/2$; $h=4$ мм; $\alpha=20^\circ$; $\gamma=5^\circ$, $\theta=10-80^\circ$.

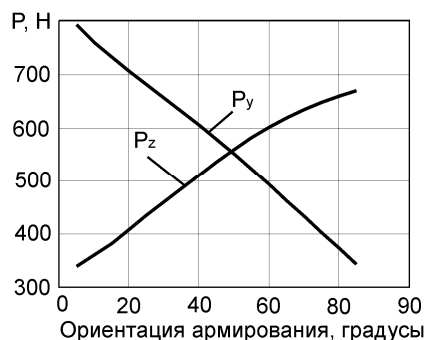


Рисунок 2 – Расчетные значения сил резания

Расчет составляющих сил резания представлен на рис. 2. В выражении (4) угол ориентации армирующих волокон не входит и силы, возникающие на задней плоскости, которые зависят от значения заднего угла α . Кроме того, по данным [1] значение силы по задней поверхности находится в пределах от 3 до 50 % от силы P_z , что не согласуется с данными на рис. 2. Количественные значения составляющих силы резания существенным образом зависят от ширины среза и свойств обрабатываемого материала, и провести какое-либо сравнение не представляется возможным. Однако по данным [1], например, для стеклопластиков, расчетные и экспериментальные значения этих сил практически на порядок меньше.

Заключение. Расчет составляющих силы резания при обработке армированных композитов является важным фактором для оценки качества обработанной поверхности и оценки стойкости режущего инструмента. Предложенные в работе [12] соотношения отражают качественное распределение сил для различных углов ориентации армирования. С увеличением угла армирования величина силы среза P_z возрастает, P_H уменьшается. Однако количественные значения этих сил не согласуются с имеющимися в литературе данными. Поэтому использование приведенных формул, например, для расчета силы трения при изнашивании вершины инструмента является не совсем корректным.

Литература

1. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов.– Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987.– 176 с.
2. Machining of fibre reinforced plastics/ König, W., Wulf, Ch., Gra P., Willerscheid, H. // Annals of the CIRP, 1985. –34.– P. 537–548.
3. Wang, X.M., Zhang, L.C. Machining damage in unidirectional fibre-reinforced plastics. / In: Wang J., Scott W., Zhang, L.C. Abrasive Technology—Current Development and Applications. World Scientific, 1999, Singapore, pp. 429–436.

4. Wang D.H., Ramulu, M., Arola, D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite // Part I: unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995. –35. – P. 1623–1638.
5. Kishawy, H.A., Kannan, S., Balazinski, M. An energy based analytical force model for orthogonal cutting of metal matrix composites // *Annals of the CIRP*, 2004. –53. – P. 91–94.
6. Pramanik A., Zhang L.C., Arsecularatne J.A. Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006.–46.– P. 1795–1803.
7. Arola D., Ramulu M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis // *International Journal of Mechanical Science*, 1997. – 39.– P. 597–613.
8. Mahdi, M., Zhang, L.C. A finite element model for the orthogonal cutting of fibre-reinforced composite materials // *Journal of Materials Processing Technology*, 2001. – 113.– P. 373–376.
9. Assessment of the exit defects in carbon fibre-reinforced plastic plates caused by drilling /Zhang H.J., Chen W.Y., Chen D.C., Zhang L.C. // *Key Engineering Materials*, 2001.– 196.– P. 43–52.
10. Zhang L.C., Zhang H.J., Wang X.M. A new mechanics model for predicting the forces of cutting unidirectional fibre-reinforced composite // *Machining Science and Technology*, 2001. – 5.– P. 293–305.
11. Хавин Г.Л. Моделирование абразивного износа инструмента при точении армированных композиционных материалов // *Вісник НТУ “ХПІ”*. Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”.– 2008.– №22.– С. 66–76.
12. Zhang L.C. Cutting composites: A discussion on mechanics modeling // *Journal of Materials Processing Technology*, 2009.–209. – P. 4548–4552.

Bibliography (transliterated)

1. Stepanov A.A. Obrabotka rezaniem vyisokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov.– L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1987.– 176 p.
2. Machining of fibre reinforced plastics König, W., Wulf, Ch., Gra P., Willerscheid, H. *Annals of the CIRP*, 1985. –34.– P. 537–548.
3. Wang, X.M., Zhang, L.C. Machining damage in unidirectional fibre-reinforced plastics. In: Wang J., Scott W., Zhang, L.C. *Abrasive Technology—Current Development and Applications*. World Scientific, 1999, Singapore, pp. 429–436.
4. Wang D.H., Ramulu, M., Arola, D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite Part I: unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995. –35. – P. 1623–1638.
5. Kishawy, H.A., Kannan, S., Balazinski, M. An energy based analytical force model for orthogonal cutting of metal matrix composites *Annals of the CIRP*, 2004. –53. – P. 91–94.
6. Pramanik A., Zhang L.C., Arsecularatne J.A. Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006.–46.– P. 1795–1803.
7. Arola D., Ramulu M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis *International Journal of Mechanical Science*, 1997. – 39.– P. 597–613.
8. Mahdi, M., Zhang, L.C. A finite element model for the orthogonal cutting of fibre-reinforced composite materials *Journal of Materials Processing Technology*, 2001. – 113.– P. 373–376.
9. Assessment of the exit defects in carbon fibre-reinforced plastic plates caused by drilling Zhang H.J., Chen W.Y., Chen D.C., Zhang L.C. *Key Engineering Materials*, 2001.– 196.– P. 43–52.
10. Zhang L.C., Zhang H.J., Wang X.M. A new mechanics model for predicting the forces of cutting unidirectional fibre-reinforced composite *Machining Science and Technology*, 2001. – 5.– P. 293–305.
11. Havin G.L. Modelirovanie abrazivnogo iznosa instrumenta pri tochenii armirovannykh kompozitsionnykh materialov *Visnik NTU “HPI”*. Zb. nauk. prats. Tematichnyi vip.: Tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Harkiv: NTU “HPI”.– 2008.– #22.– p. 66–76.
12. Zhang L.C. Cutting composites: A discussion on mechanics modeling *Journal of Materials Processing Technology*, 2009.–209. – P. 4548–4552.

Работа выполнена по проекту M2132, который финансируется Министерством образования и науки, молодежи и спорта Украины

УДК 621.91

Хавін Г.Л.

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМУ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто питання визначення складових сили різання при точінні композиційних матеріалів, армованих волокнами або джгутами. Досліджується можливість використання співвідношення для підрахунку сил різання по задній поверхні, що враховують кут орієнтації волокон. Зроблено висновок про те, що запропоноване співвідношення не зовсім точно кількісне співпадає з експериментальними даними і їх використання для прогнозування зношування інструменту проблематичне.

Khavin G.

MODELLING OF FIBRE REINFORCED MATERIALS CUTTING MECHANISM

The problem of defined of the cutting force components for reinforce composite materials turning is considered. The possibility to use correlation for cutting force of back surface with take account of orientation angle is researched. The resume about correct correlations and theirs coincides with experimental data and using for wearing tool is problematical.