

УДК 621.9

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕЗАНИЯ

© 2009 М. В. Винокуров, А. Н. Дружин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены модели резания Зворыкина и Мерчанта, дополненные теоретическими разработками Рейто и результатами аналитического и экспериментального исследования Оксли. С целью оценки их адекватности и выбора наиболее корректной модели представлены данные сравнительного анализа указанных моделей и их комбинаций с экспериментальными результатами, описанными традиционными эмпирическими соотношениями в виде степенных зависимостей с набором табличных коэффициентов. Предложены пути повышения соответствия теоретических моделей реальным физическим явлениям, сопровождающим процесс резания.

Теоретические и экспериментальные модели резания, параметры резания, сравнение моделей.

Выбор рационального режима обработки конструкционных материалов резанием опирается на использование различных моделей технологического процесса, в основу которых положена зависимость силы резания и её составляющих от режимных параметров процесса (глубины, подачи, скорости резания), конструктивного исполнения инструмента, материалов инструмента и заготовки. При этом традиционно используются эмпирические модели, аппроксимирующие имеющиеся экспериментальные данные. Однако они требуют больших объёмов исходной информации и применимы в узком диапазоне изменения определяющих параметров, ограниченном условиями проведения эксперимента.

Расширение автоматизации проектирования технологических процессов и появление новых конструкционных материалов, технология обработки которых ещё недостаточно изучена, делает перспективным использование теоретических моделей резания, основанных на знании основных физических свойств материалов (теплопроводности, теплоемкости, предела прочности и др.). Несмотря на меньшую точность, эти модели применимы в широком спектре изменения основных конструктивных и режимных факторов, при использовании перспективных конструкционных и инструментальных материалов, так как описываются компактными математическими выражениями с мини-

мальным набором эмпирических коэффициентов.

В работе представлены некоторые результаты сравнительного анализа нескольких теоретических моделей, оценена их адекватность данным эксперимента, рассмотрены возможности повышения точности моделирования при разработке технологических процессов резания.

Теоретические модели резания

Для сравнительного анализа в качестве базовых выбраны известные модели резания Зворыкина [1] и Мерчанта [2], которые дополнены теоретическими разработками Рейто [3] и результатами аналитического исследования и статистического анализа экспериментов Оксли [2]. Адекватность выбранных моделей экспериментальным данным оценивалась по известным эмпирическим аппроксимациям [4] для операции токарной обработки, представляющим собой степенные зависимости силы резания и её составляющих от режимных параметров процесса, конструктивного исполнения инструмента, свойств материалов инструмента и заготовки. Очевидным преимуществом эмпирической модели является достоверность, поскольку она построена на опытных данных. Основной недостаток состоит в том, что её использование требует знания табличных значений показателей степеней и коэффициентов эмпирических уравнений, полученных в конкретном эксперименте и учитывающих

влияние ограниченного числа факторов на силу резания и её составляющие в исследованном диапазоне их изменения. В то же время теоретические модели при определённых условиях могут быть более общими и удобными при разработке программного обеспечения технологических процессов резания.

Для сравнения и оценки различных моделей и их комбинаций использовалось их математическое описание в следующей форме.

Модель Зворыкина [1, 3] построена исходя из предположения, что сила резания определяется сопротивлением материала обрабатываемой заготовки пластической деформации стружкообразования и силой трения в месте взаимодействия лезвия резца и заготовки. В основу положена расчётная схема работы резца, перемещающегося относительно заготовки со скоростью резания. Предполагается, что со стороны материала обрабатываемой заготовки к передней поверхности лезвия резца приложены приведённая нормальная сила, перпендикулярная передней поверхности, и приведённая сила трения стружки о переднюю поверхность. К задней поверхности лезвия приложены приведённая сила, перпендикулярная направлению движения резца, и приведённая сила трения, направленная против движения резца. При такой схеме стружкообразования пластическая деформация условно протекает только в плоскости скалывания. Система сил, действующих в зоне стружкообразования на пластически деформируемый материал, инициирует сопротивление пластической деформации и представлена тремя составляющими: нормальной силой, силой внутреннего трения и силой, образованной касательными напряжениями в плоскости скалывания. Направление нормальной силы перпендикулярно плоскости скалывания, образует угол сдвига ϕ с направлением основного движения резца.

Главная составляющая силы резания P_z совпадает по направлению со скоростью резания и равна сумме проекций всех сил, приложенных к лезвию, на это направление:

$$P_z = \frac{St\tau_B [(z - \mu^2)\cos\gamma + 2\mu\sin\gamma]}{\sin\phi [(1 - \mu\mu_0)\cos(\phi - \gamma) + (\mu + \mu_0)\sin(\phi - \gamma)]},$$

где S – подача, м/об.; t – глубина резания, м; τ_B – предел прочности обрабатываемого материала, Па; μ и μ_0 – коэффициенты внешнего и внутреннего трения скольжения обрабатываемого материала соответственно; z – коэффициент упрочнения формы по Рейто [3], в данной модели $z=1$; γ и ϕ – передний угол и угол сдвига соответственно, град.

Перпендикулярно направлению скорости резания действует другая составляющая силы резания P_{xy} , равная сумме проекций всех сил на направление, нормальное скорости резания:

$$P_{xy} = \frac{St\tau_B [\mu\cos\gamma - z\sin\gamma]}{\sin\phi [(1 - \mu\mu_0)\cos(\phi - \gamma) + (\mu + \mu_0)\sin(\phi - \gamma)]}.$$

Силу P_{xy} , в свою очередь, для операций токарной обработки можно разложить на две составляющие, соответственно, радиальную и осевую:

$$P_y = P_{xy} \cos\phi; \quad P_x = P_{xy} \sin\phi.$$

Модель Зворыкина даёт следующее выражение для угла сдвига:

$$\phi = 45^\circ - 0,5(\operatorname{arctg}\mu + \operatorname{arctg}\mu_0 - \gamma). \quad (1)$$

Математическое описание остальных моделей, рассмотренных в работе, содержит только те соотношения, которые отличаются от приведённых выше.

Теория Мерчанта [2] представляет собой модель с одной плоскостью сдвига и построена в рамках следующих допущений:

- вершина резца является абсолютно острой, трение между инструментом и заготовкой отсутствует;
- деформация металла двухмерная (плоская), боковое скольжение отсутствует;
- напряжения в плоскости сдвига распределены равномерно;
- результирующая сила, приложенная к стружке в плоскости сдвига, равна по вели-

чине и противоположна по направлению силе, приложенной к ней в зоне контакта с передней поверхностью резца.

Исходя из этих предположений, угол сдвига определяется выражением

$$\phi = 45^{\circ} - 0,5(\operatorname{arctg} \mu_0 - \gamma). \quad (2)$$

Соотношения для составляющих силы резания в модели Мерчанта имеют следующий вид:

$$P_Z = 2St\tau_B z \operatorname{ctg} \phi;$$

$$P_{XY} = St\tau_B z (\operatorname{ctg}^2 \phi - 1).$$

Модель Оксли [2] включает уточнённое соотношение для угла сдвига. Он применил упрощённое поле линий скольжения к модели Мерчанта. Зона деформации при этом принята ограниченной прямыми, параллельными линиям скольжения, под углом сдвига к направлению движения. Для описания условий в зоне пластической деформации использовано усовершенствованное соотношение Хенки [2], учитывающее упрочнение материала. Результатом исследования стало соотношение для угла сдвига по Оксли, лучше согласующееся с экспериментом, чем формулы (1) или (2):

$$\phi = 50^{\circ} - 0,8(\operatorname{arctg} \mu_0 - \gamma). \quad (3)$$

Использование выражения (3) в составе модели Мерчанта даёт следующие соотношения для составляющих силы резания:

$$P_Z = \frac{St\tau_B z \cos(\operatorname{arctg} \mu_0 - \gamma)}{\sin \phi \cos(\phi + \operatorname{arctg} \mu_0 - \gamma)};$$

$$P_{XY} = \frac{St\tau_B z \sin(\operatorname{arctg} \mu_0 - \gamma)}{\sin \phi \cos(\phi + \operatorname{arctg} \mu_0 - \gamma)}.$$

Модель Рейто [3] построена с целью решения вопроса об усилиях резания на базе теории пластических деформаций, в её ос-

нову положена теория линий скольжения. Рейто рассматривал процесс деформации стружки как сжатие призматического бруска с размерами поперечного сечения $a \times b$ и считал материал стружки состоящим из отдельных зёрен, связанных друг с другом «силами притяжения» (зависящими, прежде всего, от предела прочности обрабатываемого материала).

Выполненный им анализ даёт выражение для разрушающей силы сжатия бруска (аналог силы резания) в следующем виде:

$$P_Z = abt_B z, \quad (4)$$

где $a = S \sin \phi$ и $b = t / \sin \phi$ – геометрические размеры срезаемого слоя металла в направлении подачи и глубины резания соответственно, м.

Выражение (4) содержит коэффициент z , который учитывает наряду с размерами поперечного сечения его форму, т. е. соотношение между a и b по формуле:

$$z = \sqrt[4]{\frac{(b + 2a)(b + a)}{6ab}}. \quad (5)$$

Выражение (5) получено Рейто теоретическим путём и проверено на опыте. Изученное им явление, подтверждённое другими исследователями, носит название «упрочнение формы».

Эта модель получена в упрощённой постановке задачи, но её ценность определяется наличием коэффициента упрочнения формы z , который в отличие от других моделей позволяет учесть влияние глубины резания и подачи на величину силы резания.

Результаты сравнительного анализа теоретических моделей резания с традиционными эмпирическими соотношениями

Результаты расчётов по различным моделям графически представлены на рис. 1...5 в виде зависимостей силы резания P , соответственно, от глубины резания, подачи, переднего угла, угла сдвига и предела прочности обрабатываемого материала.

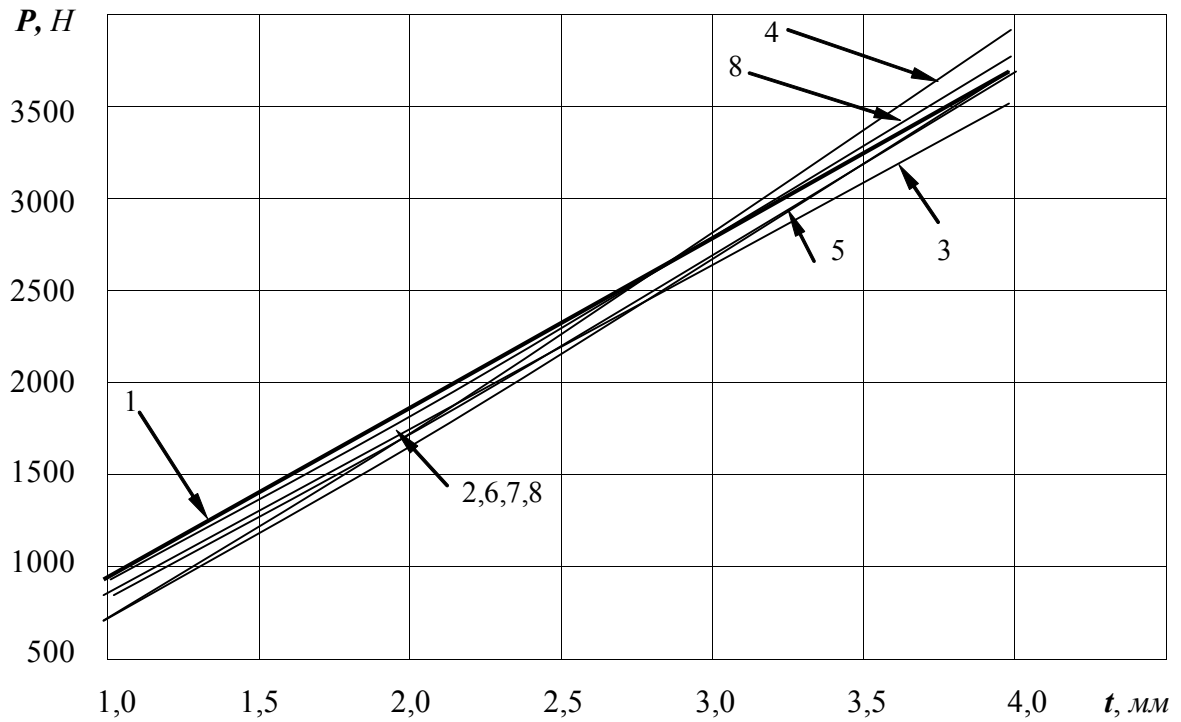


Рис. 1. Зависимость силы резания от глубины резания

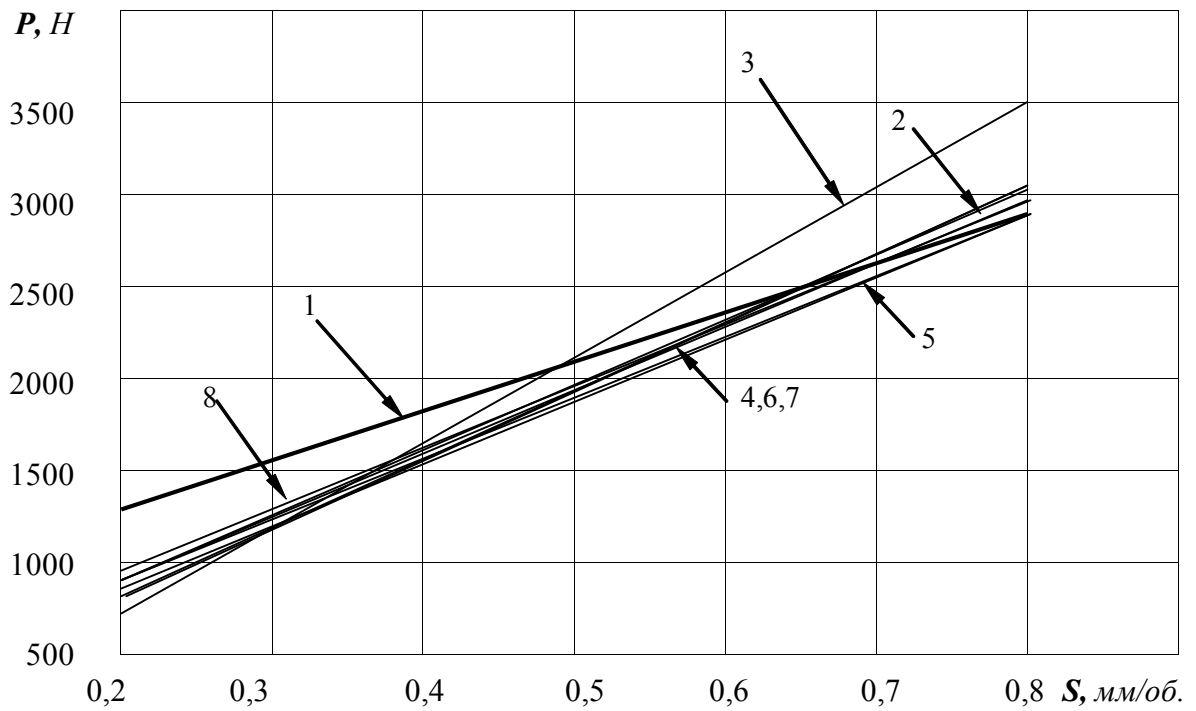


Рис. 2. Зависимость силы резания от подачи

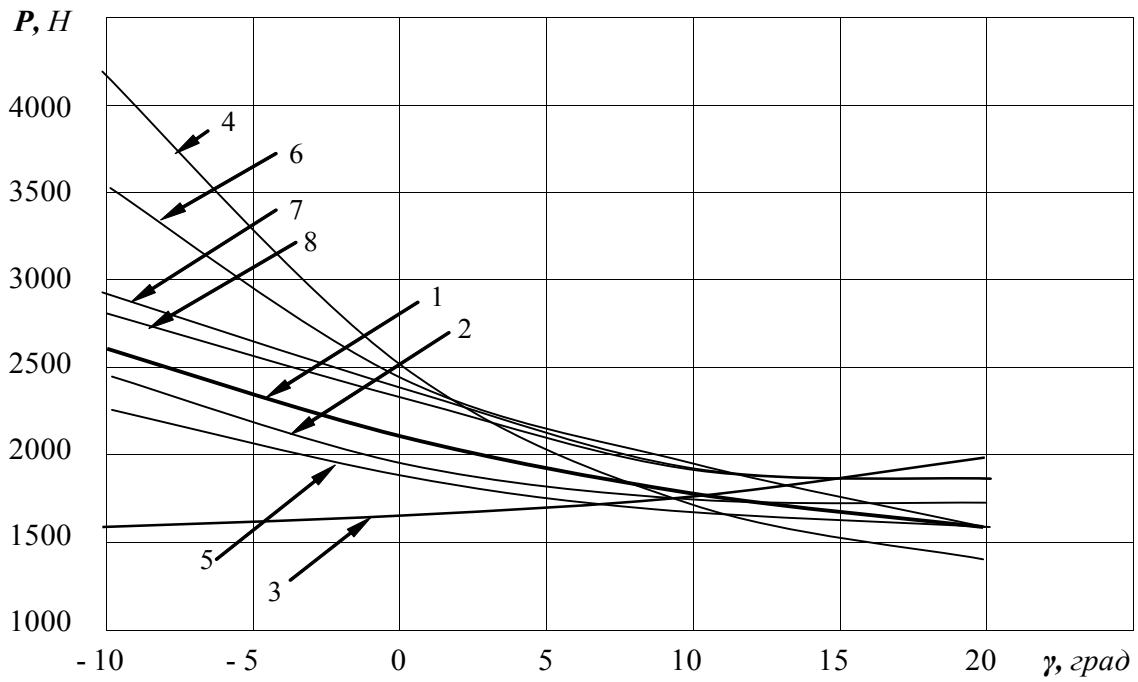


Рис. 3. Зависимость силы резания от переднего угла

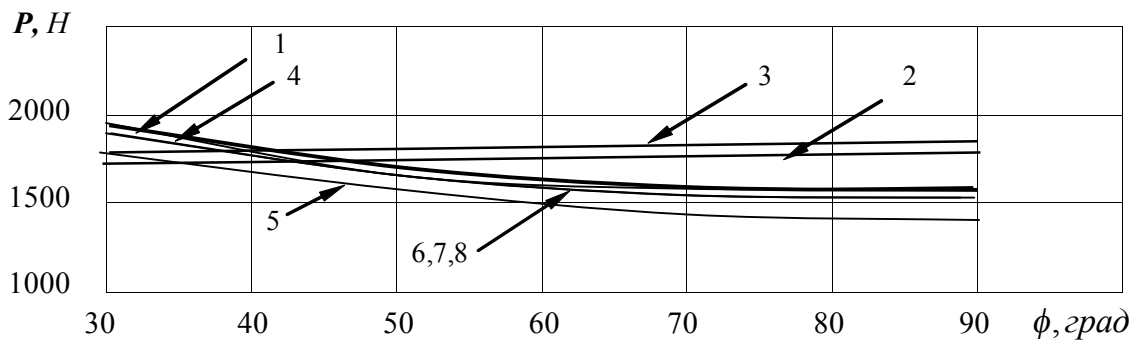


Рис. 4. Зависимость силы резания от угла сдвига

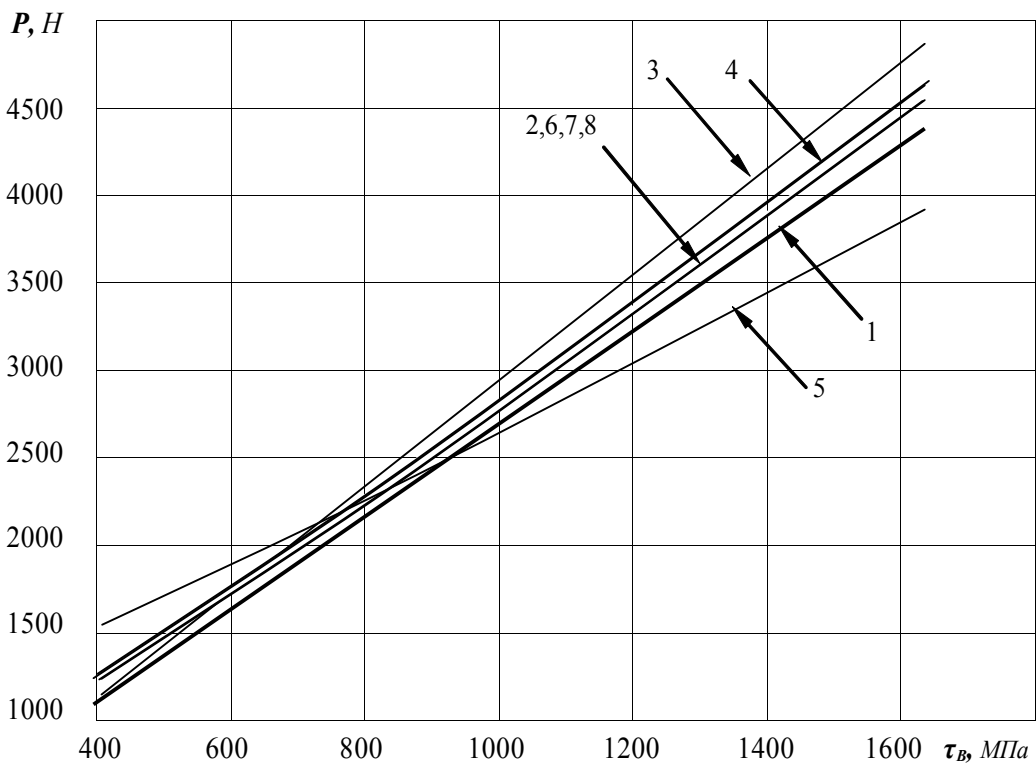


Рис. 5. Зависимость силы резания от предела прочности обрабатываемого материала

В работе представлены полученные результаты для указанных выше моделей и их комбинаций, различающихся, прежде всего, соотношениями для угла сдвига (1), (2) или (3) и значениями коэффициента упрочнения формы (5).

На рисунках полученные результаты расчётов по моделям и их комбинациям обозначены цифрами:

- 1 – эмпирическая модель [4];
- 2 – модель Зворыгина [1];
- 3 – модель Зворыгина [3];
- 4 – модель Зворыгина - Рейто [3];
- 5 – модель Зворыгина - Рейто [1;3];
- 6 – модель Мерчанта [2];
- 7 – модель Мерчанта - Оксли [2];
- 8 – модель Мерчанта - Рейто [2;3].

Полученные данные показывают удовлетворительную качественную зависимость силы резания от подачи и угла сдвига только для моделей, содержащих коэффициент упрочнения формы по Рейто.

Наилучшее количественное согласование (наименьшее среднеквадратичное отклонение) по величине силы резания P с эмпирическими данными [4] в исследованном диапазоне влияющих факторов получено для теоретических моделей Зворыгина [1] и Мерчанта [2], содержащих коэффициент упрочнения формы по Рейто [3]. Величина угла сдвига ϕ в большей степени соответствует аналитическому исследованию и данным эксперимента [2], аппроксимированным Оксли.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает хорошее качественное и удовлетворительное количественное (относительная погрешность $\delta \leq 10\%$) согласование расчётных и экспериментальных данных по величине силы резания для модели Мерчанта с углом сдвига по Оксли и коэффициентом упрочнения формы по Рейто в исследованном диапазоне изменения параметров: $t=1 \dots 4$ мм; $S=0,2 \dots 0,8$ мм/об; $\phi = 30 \dots 90^\circ$; $\gamma = -10 \dots +20^\circ$; $\tau_B = 420 \dots 1650$ МПа.

Проведённое исследование открывает возможности использования теоретических моделей для выбора рационального режима обработки новых конструкционных материалов, для которых отсутствуют эмпирические данные, при проектировании технологических процессов и разработке управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением. В качестве следующего шага по улучшению теоретических моделей представляется целесообразным ввести учёт зависимости предела прочности обрабатываемого материала от температуры в зоне резания и скорости резания, что позволит математически описать влияние скорости на силу резания.

Библиографический список

1. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
2. Армареги И. Дж., Браун Р. Х. Обработка металлов резанием: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
3. Резников Н. И. Учение о резании металлов. – М.: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1947. – 588 с.
4. Аранзон М. А. Расчет режимов резания при точении с применением ЭВМ: Методическое руководство. – Куйбышев: КПТИ, 1981. – 48 с.

References

1. Granovsky G., Granovsky I. Cutting of metals: The Textbook for high schools. - M: High. school., 1985. - 304 p.
2. Armarego I. D., Brown R. H. Processing of metals by cutting. The lane with English - M: Mechanical engineering, 1977. - 325 p.
3. Reznikov N. I. Doctrine about cutting of metals. - M: GNTI The Machine-building literature, 1947. - 588 p.
4. Aranzon M. A. Calculation of utting modes with computer application: The Methodical management. - Kuibyshev: KPТИ, 1981. - 48 p.

SOME RESULTS OF ANALYSING THEORETICAL CUTTING MODELS

© 2009 M. V. Vinokurov, A. N. Druzhin

Samara State Aerospace University

Zvorykin and Merchant cutting models are considered, complemented with theoretical Reito developments and results of analytical and experimental Oxley investigation. In order to estimate their adequacy and choose the most correct model the data of comparative analysis of the models in question and their combinations with experimental results described by traditional empirical relationships in the form of exponential dependences with a set of table coefficients are presented. Ways to improve the compliance of theoretical models with actual physical phenomena that accompany the cutting process are proposed.

Theoretical and experimental cutting models, cutting parameters, comparison of models.

Информация об авторах

Винокуров Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет. Область научных интересов: газовая динамика, теплообмен, механическая обработка материалов. E-mail: engin@ssau.ru

Дружин Алексей Николаевич, кандидат технических наук, начальник отдела, Самарский государственный аэрокосмический университет. Область научных интересов: газовая динамика, теплообмен, механическая обработка материалов. E-mail: drushin@ssau.ru.

Vinokurov, Michael Vladimirovich, candidate of technical sciences, senior lecturer, Samara State Aerospace University. Area of research: gas dynamics, heat exchange, machining of materials. E-mail: engin@ssau.ru.

Druzhin, Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, chief of department, Samara State Aerospace University. Area of research: gas dynamics, heat exchange, machining of materials. E-mail: drushin@ssau.ru.