

© 2014

О.И. Иванов, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Высшая математика и математическое моделирование»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: стружка; процесс стружкообразования; резание металлов; реологические модели.

Аннотация: Центральным элементом технологической системы является процесс резания. Для качественного управления технологическим процессом необходимо построение модели стружкообразования, адекватной реальным условиям резания. Модель должна быть достаточно простой и вместе с тем должна отражать физические явления в процессе стружкообразования. Кроме этого, модель должна обладать разнообразными динамическими характеристиками и согласовываться с экспериментальными данными при вариации ее параметров.

Известно, что в процессе непрерывного стружкообразования параллельно идут процессы упругого и пластического деформирования срезаемого слоя, деформация обрабатываемого металла по условной плоскости сдвига, процессы контактного взаимодействия (трение, адгезия, диффузия и др.) формируемой стружки с передней поверхностью инструмента, а также контактного взаимодействия обрабатываемого материала с площадкой износа по задней поверхности инструмента.

Рассмотрим пять моделей процесса резания металлов. Первая модель с одноплоскостной схемой стружкообразования. В этой модели стружкообразование рассматривают как процесс пластического деформирования в единственной плоскости сдвига.

Во второй модели стружка образуется в результате последовательного сдвига по плоскости элементарных объемов срезаемого слоя, который пластически не деформируется.

В третьей модели предполагается, что пластическая деформация металла в зоне сдвига является результатом сжатия слоя металла, при этом учитывается трение стружки о переднюю поверхность инструмента и температура резания.

В четвертой модели зона сдвига представлена в виде пластически деформированного клина, ограниченного прямыми скольжениями.

В пятой модели используется схема с развитой зоной деформации с непрямолинейными поверхностями сдвига.

Анализ моделей стружкообразования и реологических моделей, соответствующих видам процесса стружкообразования, показал, что построение одной универсальной физической модели маловероятно. Предложен ряд реологических моделей. Разработанные модели служат основой для оптимизации систем автоматического управления процессом обработки резанием.

Цель работы – создание реологических моделей процесса стружкообразования при резании металлов.

Процесс резания является центральным элементом технологической системы. Для исследования динамической системы станка необходимо построение соответствующей модели процесса резания [1; 2]. Необходимо, чтобы модель была достаточно простой; вместе с тем она должна отражать адекватно физические явления в процессе стружкообразования. Кроме этого, модель должна обладать разнообразными динамическими характеристиками и согласоваться с экспериментальными данными при вариации ее параметров.

При обработке металлов резанием в зависимости от режимов резания, геометрии инструмента, физико-механических свойств обрабатываемой заготовки и инструмента, вида и метода подвода смазочно-охлаждающей жидкости и других, менее значимых, факторов могут существовать различные виды контактного взаимодействия и образовываться различные виды стружек. Исследователей, как правило, интересует не вид стружки, а процесс ее стружкообразования. Но каждому виду стружки соответствуют свои закономерности процесса стружкообразования.

На рис. 1 дано схематическое изображение диапазонов скоростей резания, в пределах которых формируются различные виды стружек и виды контактного взаимодействия [3]. Переход от одного вида к другому происходит постепенно.

В соответствии с данными, полученными в результате исследований, в широком диапазоне скорости резания могут существовать следующие виды стружек: (рис. 1а) М – образующиеся при резании с микроскоростями; Э – элементные; Ф – суставчатые; С – сливные; Ц – циклические.

Некоторые исследователи элементные и суставчатые стружки объединяют в один вид и называют их стружками скалывания. При обработке хрупких металлов (чугуна, бронзы и др.) образуются стружки надлома.

В широком диапазоне скоростей резания могут существовать различные виды контактного взаимодействия. Наиболее часто с повышением скорости резания происходит последовательная смена следующих видов контактного взаимодействия (рис. 1б): К – при резании с микроскоростями (внешнее трение); Р – контактное пластическое деформирование при образовании элементных и суставчатых стружек; А, Б, В – наростообразование при последовательной смене видов наростов

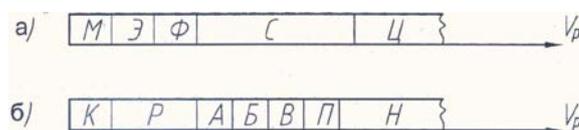


Рис. 1. Виды стружек (а)
и виды контактного взаимодействия (б)

А, Б, В;П – неустойчивое пластическое деформирование в пределах пульсирующей контактной зоны; Н – существование пластичного вязкого участка.

Таким образом, существует большое число видов резания, классифицируемых по различным признакам. В то же время при том или ином конкретном методе обработки образуется сочетание различных видов резания, поэтому каждый метод будет иметь свои особенности.

Результаты исследований [3; 4; 5; 6; 7; 8] показывают, что в процессе непрерывного стружкообразования параллельно идут процессы упругого и пластического деформирования срезаемого слоя, деформация обрабатываемого металла по условной плоскости сдвига, процессы контактного взаимодействия (трение, адгезия, диффузия и др.) формируемой стружки с передней поверхностью инструмента, а также контактного взаимодействия обрабатываемого материала с площадкой износа по задней поверхности инструмента.

В результате действия этих процессов в широком диапазоне скорости резания V_p могут возникать различные виды стружек и виды контактного взаимодействия (рис. 1). Поэтому построение одной универсальной математической модели процесса стружкообразования маловероятно. Скорее каждому виду взаимодействия в процессе резания, в зависимости от целей исследования, должна подбираться соответствующая модель стружкообразования, адекватная изучаемому процессу.

Рассмотрим набор возможных математических моделей, обоснование применимости которых является темой отдельного исследования. Характеристики упомянутых моделей можно находить на основе соответствующих экспериментов.

Первую модель процесса резания с одноплоскостной схемой стружкообразования иногда называют теорией Тиме-Зворыкина-Мерчанта, учитывая основополагающий вклад этих ученых в науку о резании материалов [4]. В этой модели стружкообразования рассматривают как процесс пластического деформирования в единственной плоскости сдвига, положение которой определяется углом сдвига Φ (рис. 2а). Здесь 1 – инструмент, 2 – заготовка, γ – передний угол резания, a – толщина среза. Процесс взаимодействия передней поверхности инструмента со стружкой рассматривается как внешнее трение. В связи с тем, что такая схема отлична от реальной, ее называют условной.

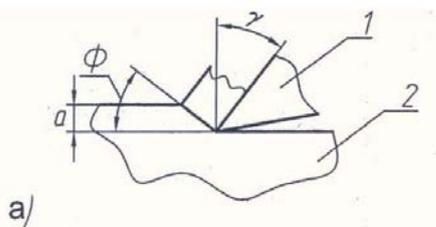


Рис. 2. Модели процессов стружкообразования

Согласно условной схеме превращение срезаемого слоя в сливную стружку происходит в результате последовательно и непрерывно снимаемых при сдвиге бесконечно тонких слоев материала по условной плос-

кости сдвига. Этот процесс протекает без нарушения связи между сдвигаемыми слоями, т. е. без нарушения сплошности материала стружки. Зная значения всех параметров, можно определить силы P_z и P_y , действующие при резании.

В связи с условностью схемы стружкообразования, а также по причине невысокой точности определения параметров точность определения P_z и P_y невысока. В то же время следует подчеркнуть, что эти модели пригодны для качественного анализа влияния различных факторов на силы резания. Так, анализ механики процесса резания с использованием условной плоскости сдвига нашел широкое применение в работах Е. Мерчанта, Э. Ли, Б. Шаффера, К.А. Зворыкина, А.М. Розенберга и др. [4]. Несмотря на внешнюю простоту условной модели с единственной плоскостью сдвига и возможностью использования ее для качественного анализа механики процесса, следует подчеркнуть, что принятие этой схемы приводит к признанию таких физических фактов, существование которых объяснить невозможно. Так, принятие условной схемы как реально существующей означает наличие мгновенного поворота вектора перемещения металла от положения вектора скорости резания V_p до положения вектора скорости движения стружки V_c ; мгновенного снижения абсолютной величины скорости от V_p до V_c ; мгновенного возрастания степени деформации от 0 до 2,5–3 единиц, т.е. существования бесконечно больших скоростей деформирования. Всё это, с физической точки зрения, необъяснимо.

Согласно модели Е. Мерчанта по рис. 2б, стружка образуется в результате последовательного сдвига по плоскости элементарных объемов срезаемого слоя, который пластически не деформируется.

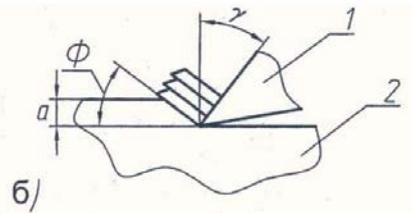


Рис. 2. Модели процессов стружкообразования

В модели по рис. 2в, предполагается, что пластическая деформация металла в зоне сдвига является результатом сжатия слоя металла, при этом учитываются трение стружки о переднюю поверхность инструмента и температура резания [4].

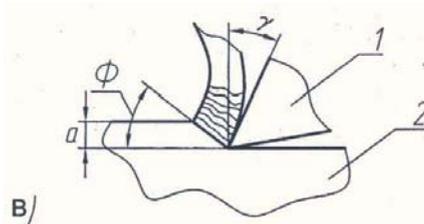


Рис. 2. Модели процессов стружкообразования

В модели на рис. 2г, зона сдвига представлена в виде пластически деформированного клина OAB, ограниченного прямыми скольжения OA и OB.

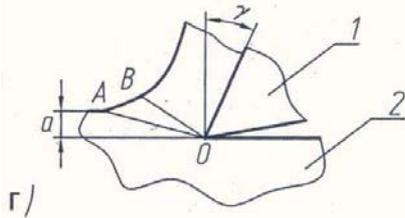


Рис. 2. Модели процессов стружкообразования

Все эти модели, построенные на представлениях о плоском сдвиге, имеют те же недостатки, что и модель с одной условной плоскостью сдвига (рис. 2а).

Альтернативным представлением схем с одной плоскостью сдвига является схема с развитой зоной деформации. Н.Н. Зорев [5], изучавший особенности стружкообразования, силы резания, контактные процессы на задней и передней поверхностях инструмента и исследовавший особенности свободного и косоугольного резания, разработал свою схему стружкообразования с развитой зоной деформации с непрямолинейными поверхностями сдвига (рис. 2д). При этом площадь зоны сдвига зависит от скорости резания V_p ; с ее увеличением зона сдвига, занимающая площадь AOB (рис. 2д), сужается до площади BOC.

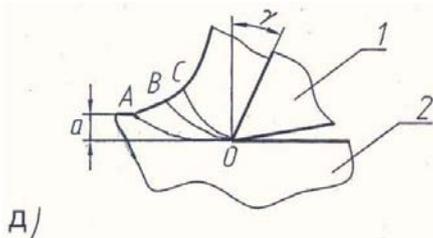


Рис. 2. Модели процессов стружкообразования

Как при статическом, так и при динамическом деформировании металлов проявляются более 10 реологических свойств (упругость, вязкость, пластичность, релаксация, ползучесть, преддействие, последствие, ковкость, красностойкость, хрупкость и др.) [9]. Реальные материалы обладают всеми реологическими свойствами, выраженными в разной степени. Полагаем, что это утверждение относится и к металлам в процессе резания.

В процессе образования стружки в теории резания принято выделять этапы: упругой и пластической деформации, упрочнения, разрушения, 2–4 этапа контактного взаимодействия стружки с передней поверхностью инструмента, а также контактное взаимодействие заготовки с задней поверхностью инструмента.

Со стороны же системы управления процесс резания, рассматриваемый как объект управления, представляется непрерывным во времени. Физические свойства деформируемого металла могут быть наглядно отобра-

жены в виде реологической модели, представленной совокупностью механических элементов упругости, вязкости и пластичности. Каждый из этих элементов или их сочетание характеризует основные свойства материала и позволяет представить его напряженно-деформированное состояние под действием внешних нагрузок; все другие механические свойства являются производными от указанных выше.

Обобщенные реологические модели процесса резания, соответствующие схеме с развитой зоной деформации (рис. 2д), представлены на рис. 3а и 3б.

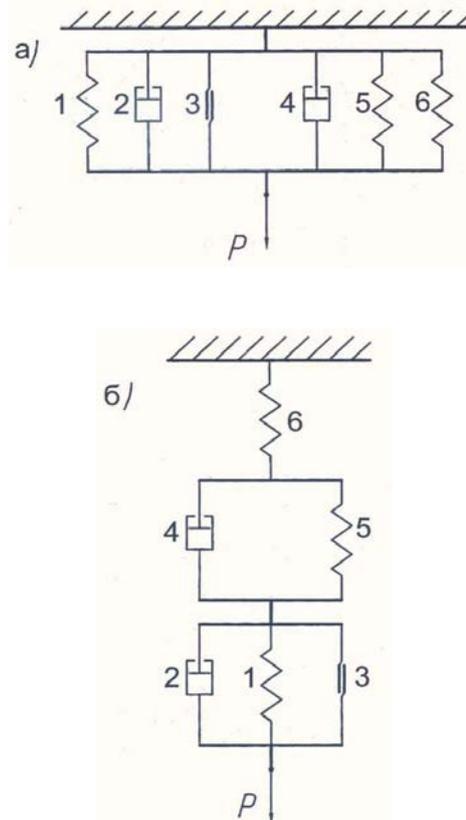


Рис. 3. Реологические модели процессов резания

Здесь: 1 – элемент упругости, 2 – вязкости, 3 – пластичности в процессе стружкообразования; элементы 4 и 5 отображают вязкость и упругость в процессе взаимодействия стружки с передней поверхностью инструмента; элемент 6 отображает процесс контактного взаимодействия заготовки с задней поверхностью инструмента. Эти модели могут быть упрощены до трехэлементных (рис. 3в и 3г) и двухэлементной (рис. 3д).

Передаточная функция двухэлементной модели Фойхта (рис. 3д), соответствующей схеме с единственной плоскостью сдвига, совпадает с предложенной А.В. Кудиновым [10] динамической характеристикой резания:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1},$$

где T – постоянная времени; k – коэффициент усиления,

$$T = \frac{\mu}{E},$$

где E и μ – коэффициенты упругости и вязкости;

$$k = \frac{1}{E}.$$

Постоянную времени T и коэффициент усиления k можно рассчитать по формулам, предложенным

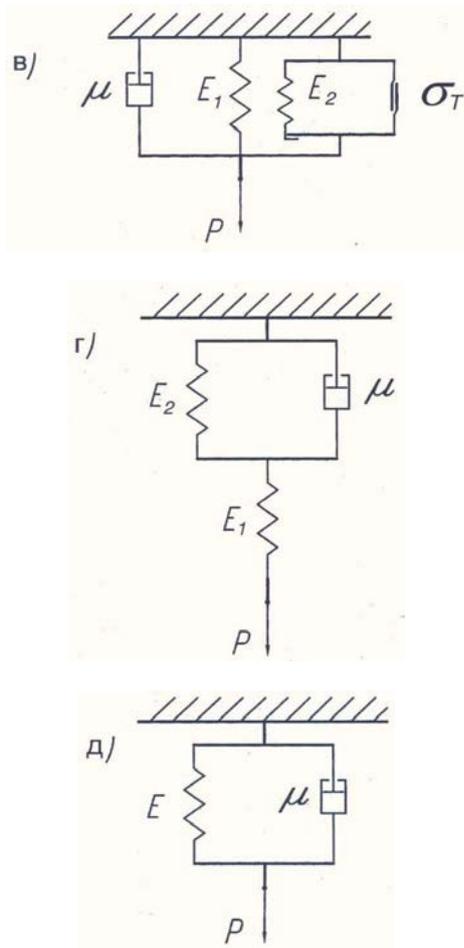


Рис. 3. Реологические модели процессов резания

А.В.Кудиновым [10], или получить экспериментально. Для этого искусственно создается изменение припуска или относительное смещение резца и заготовки по какому-либо закону (синусоидальное, ступенчатая и т. п.). Малоинерционной аппаратурой фиксируется изменение толщины срезаемого слоя и силы резания. Обработка полученных записей известными методами позволяет построить характеристику резания и определить ее параметры.

Выводы. Разработанные модели служат основой для оптимизации систем автоматического управления процессов резания. Эффективность управления во многом определяется качеством самой модели – степенью ее адекватности реальным условиям стружкообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов О.И., Драчев О.И. Модели динамических явлений процесса механической обработки длинномерных осесимметричных деталей // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 2. С.140–143.
2. Драчев О.И., Иванов О.И. Концепция современной технологии осесимметричных деталей малой жесткости // Наука – производству. 2001. № 9. С. 15–17.
3. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.
4. Малышев В.И. Очерки истории науки о резании материалов : монография. Тольятти : ТГУ, 2011. 215 с.
5. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.
6. Клушин М.И. Резание металлов. М.: Машгиз, 1958. 453 с.
7. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 160 с.
8. Розенберг А.М., Розенберг Ю.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. Киев: Наукова думка, 1990. 320 с.
9. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. 223 с.
10. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.

ON THE SIMULATION OF CHIP FORMATION PROCESS BY METAL-CUTTING

© 2014

O.I. Ivanov, candidate of technical sciences,

Assistant Professor of the Department «Higher Mathematics and Mathematic Modeling»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: chip; chip formation process; metal cutting; rheological models.

Annotation: The central element of a technological system is the process of cutting. For quality control of the process it is necessary to construct chip formation model adequate to real conditions of cutting. The model should be rather simple and at the same time, it should display physical phenomena during chip formation process. In addition, the model should have various dynamic characteristics and correlate with experimental data when varying its parameters.

It is known, that within continuous chip formation parallel processes take place: the processes of elastic and plastic deformation of a cut off layer, deformation of base metal along the hypothetical shear plane, the processes of contact interaction (friction, adhesion, diffusion, etc.) of formed chip with the face of tool, as well as the contact interaction of base metal with the worn place of tool backoff.

Five models of metal cutting process will be considered in the article. The first model is the model with one-surface method of chip formation. Chip formation in this model is described as a process of plastic deformation within a single shear plane.

In the second model chips are formed in the result of successive shift along the plane of elementary volumes of a cut off layer, which is not plastically deformed.

In the third model, it is assumed, that plastic deformation of metal in the shear zone is a result of compression of metal layer, and in this case the friction of chip on the face of tool and the cutting temperature are taken into account.

In the fourth model the shear zone is represented in the form of a plastically deformed wedge bounded by straight glides.

In the fifth model the method of developed deformation zone with out-of-straightness shear surfaces is used.

The analysis of chip formation models and rheological models corresponding to the types of chip formation process showed that the construction of a single universal physical model is improbable. The author suggests a number of rheological models. The worked out models serve as the basis for optimization of automatic cutting process control systems.