

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Козлов В.Н.¹, Бабаев А.С.², Семёнов А.Р.³

¹Томский политехнический университет, ИШНПТ, доцент ОМШ

E-mail: kozlov-viktor@bk.ru;

²Томский государственный университет, старший научный сотрудник

НОЦ «Аддитивные технологии»

E-mail: a.s.babaev@mail.tsu.ru;

³Томский государственный университет, младший научный сотрудник

НОЦ «Аддитивные технологии»

E-mail: artems2102@yandex.ru

При резании стали в большинстве случаев образуется сливная стружка, поэтому зона первичных пластических деформаций достаточно большая (рис. 1). Для исследований и анализа процессов, происходящих в этой зоне, лучше рассматривать случай прямоугольного свободного резания при строгании пластины резцом, ширина которого b_p больше ширины строганной пластины $b_{пл}$ минимум на 1–2 мм для предотвращения образования заусенца [1–4]. В этом случае все процессы будут одинаковы в любом сечении, перпендикулярном главной режущей кромке, независимо от расстояния до боковой поверхности резца. Поэтому наблюдение за боковой поверхностью пластины и резца даёт весьма близкое представление о процессах, происходящих в глубине рассматриваемой зоны.

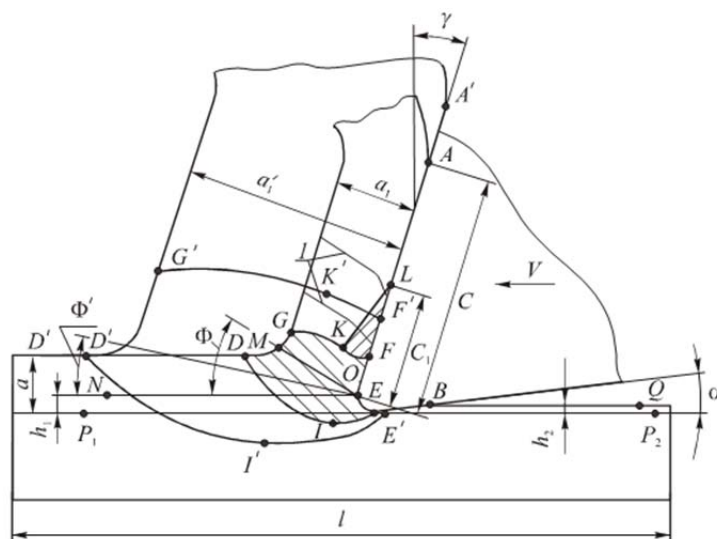


Рис. 1. Схема упругопластической деформации в зоне стружкообразования при строгании пластины

При строгании резец движется со скоростью резания V . Толщина среза a при строгании равна глубине резания t . Теоретическая линия среза P_1-P_2 касается вершины режущей кромки и параллельна направлению скорости резания [1, 2].

Практически всегда режущая кромка имеет округление радиусом ρ вследствие износа или неизбежно образуется в процессе обычной заточки инструмента. Попытки заточить на остро инструмент приводят к тому, что в самом начале резания эта острая режущая кромка неизбежно обламывается, а иногда даже только при прикосновении к ней пальцем. При резании часть металла в точке O вдавливается под радиусный участок и проходит под задней поверхностью резца. Поэтому фактически линия среза определяется линией $N-O-E-B-Q$ [1, 2].

Толщина слоя h_1 , вдавливаемого под режущую кромку металла, зависит от радиуса округления режущей кромки ρ , толщины среза a , температуры этой зоны и механических свойств обрабатываемого материала, определённых при этой температуре и при соответствующей скорости деформации $\dot{\epsilon} = \epsilon/\Delta t$, где Δt – промежуток времени, в течение которо-

го происходит деформация ε ; наличия нароста или застойной зоны обрабатываемого материала у режущей кромки. Обычно величина h_1 составляет от нескольких долей микрометра при чистовой обработке до десятых долей миллиметра при черновой обработке при существенном округлении режущей кромки и отрицательном переднем угле, но при анализе явлений на передней поверхности инструмента в первом приближении ею можно пренебречь.

Величина упругого восстановления обработанной поверхности h_2 немного меньше h_1 и зависит от тех же факторов. Существенное уменьшение её величины оказывает выдавливание на боковые поверхности пластины, пластическая деформация металла в заготовке в зоне стружкообразования и под режущей кромкой. В некоторых случаях при обработке материалов с малым коэффициентом теплопроводности и при большом радиусе округления режущей кромки, что характерно при обработке титановых сплавов труднообрабатываемых групп, может наблюдаться даже перемещение (перетекание) обрабатываемого металла в состоянии сверхпластичности под режущей кромкой со скоростью больше, чем скорость резания, и с последующим восстановлением и увеличением вследствие этого величины h_2 . От величины h_2 в большой степени зависит глубина и, главное, степень пластической деформации обработанной поверхности, долговечность детали при её эксплуатации.

При движении резца перед ним образуется зона первичной пластической деформации, в которой обрабатываемый металл деформируется уже не только упруго, но и пластически, и изменяет направление своего движения на параллельное относительно передней поверхности инструмента. Начало этой зоны определяется кривой **D-I-E**, окончание – кривой **G-K-F**.

Скорость деформаций $\dot{\varepsilon} = \varepsilon/\Delta t$ ($\varepsilon = l - l_0$) в зоне стружкообразования очень большая, на несколько порядков больше, чем при обычных испытаниях образцов на разрыв или сжатие. Большое влияние здесь оказывает скорость резания и температура, которая увеличивается вследствие пластической деформации обрабатываемого материала в зоне первичных пластических деформаций. Большая часть деформаций и изменений происходит вблизи поверхности, определяемой линией **MO**.

Чем меньше пластичность металла и больше скорость резания, а значит и скорость деформаций, тем меньше величина зоны первичной пластической деформации **D-I-E-O-F-K-G**, тем больше она сужается до плоскости **MO**, которую называют условной плоскостью сдвига. Такое название эта область получила в связи с принятием упрощения: условно считается, что вся пластическая деформация происходит только в этой зоне и по этой плоскости происходит сдвиг обрабатываемого материала из слоя, подлежащего удалению, и преобразования его в стружку.

Чем пластичнее обрабатываемый материал, тем больше усадка стружки по толщине $K_a = a_1/a$, тем меньше угол условной плоскости сдвига Φ . Угол Φ зависит не только от пластичности обрабатываемого металла, но и от переднего угла γ и режимов резания: $\text{tg } \Phi = \cos \gamma / (K_a - \sin \gamma)$ [1, 2].

Процессы в зоне стружкообразования влияют не только на силы резания, но и на распределение контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента, на тепловыделение, на распределение температуры на передней и задней поверхностях, на износ инструмента, на качество обработанной поверхности и пр. Поэтому было выполнено множество исследований этой области.

Большинство из них выполняется при строгании пластины на вертикально-фрезерном станке, где пластина закрепляется в тисках на столе станка, шпиндель блокируется и на нём устанавливается резцедержатель с резцом. Продольная подача $s_{\text{мин}}$ (мм/мин) назначается равной скорости резания v (или V) (м/мин). В этом случае при резании положение резца не изменяется, поэтому можно установить видеокамеру и наблюдать изменения на боковой поверхности зоны резания. Все исследования можно разделить на несколько направлений.

1. Исследование деформаций в зоне стружкообразования методом сеток и лунок (рис. 2).

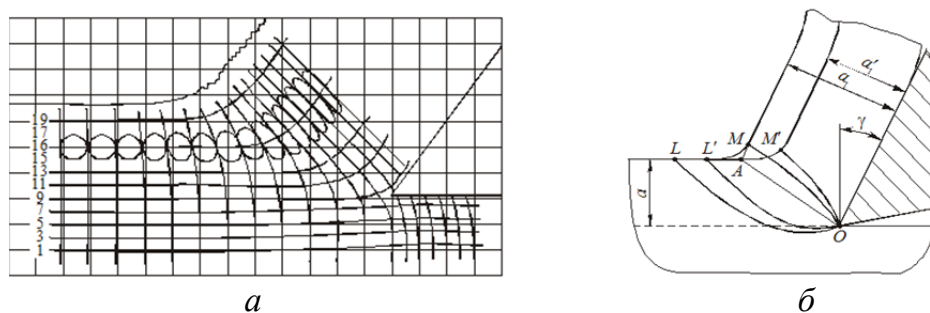


Рис. 2. Искажения координатной сетки (а), полученной методом вдавливания индентора (Г.Л. Куфарев) при строгании пластины и схема стружкообразования (б), характерная для обработки на микроскоростях

Для этого подготавливаются две абсолютно одинаковых пластины, они шлифуются и притираются друг к другу. После этого на их поверхностях, в последствие обращённых друг к другу, царапается сетка или индентором наносятся лунки (чем ближе друг к другу, тем лучше), пластины ещё раз немного притираются для удаления образовавшихся заусенцев или выпуклостей и для предотвращения даже небольших зазоров, но так, чтобы риски или лунки были различимы [1, 2].

После этого эти пластины подготовленными поверхностями друг к другу сжимаются в тисках. Это делается для того, чтобы при строгании выпучивание металла по бокам пластины не искажало получающуюся картину деформаций. Производится строгание, но не до конца по длине, чтобы осталась образующаяся стружка, ещё не отделённая от заготовок, так называемый «корень» стружки. Для этого как можно скорее резание прекращается (мгновенно), чтобы уменьшение скорости резания не привело к искажению процессов при установленной скорости резания. После этого пластины раскрепляются и анализируется получившаяся картина полос или лунок.

При резании на микроскоростях (несколько мм/мин) высокопластичных металлов (медь, латунь) по искажению делительной сетки, нанесенной на боковую поверхность среза в виде квадратов или окружностей (рис. 2, а), было доказано существование зоны стружкообразования клинообразной формы (рис. 2, б), имеющей начальную OA и конечную OM границы. Было установлено, что процесс пластической деформации начинается впереди резца на границе OL , имеющей криволинейную форму, которая в некоторых случаях располагается даже ниже теоретической линии среза.

Степень деформации обрабатываемого материала ϵ , рассчитанная по искажению делительной сетки, в точках срезаемого слоя от линии OL к линии OM возрастает сначала медленно, а затем в зоне AOM с большей скоростью. Определяется поверхность, приближающаяся по форме к плоскости, OA – условная плоскость сдвига, проведенная из вершины резца в точку пересечения наружных поверхностей заготовки и стружки.

При увеличении скорости резания на обычных скоростях, применяемых в практике, усадка стружки уменьшается, а границы зоны OL и OM поворачиваются по ходу часовой стрелки и при этом ещё и сближаются, занимая, соответственно положения OL' и OM' . При этом толщина фактической зоны деформации в районе условной плоскости сдвига составляет десятые доли миллиметра. Поэтому после протравливания кислотой шлифов «корней» стружки эта зона выглядит как плоскость, разделяющая срезаемый слой и стружку. Особенно наглядно это видно по текстуре «корней» стружек, полученных при мгновенной остановке процесса резания сталей.

Сужение зоны деформации при резании объясняется тем, что с увеличением скорости резания возрастает скорость деформации $\dot{\epsilon}$, вследствие чего происходит запаздывание пластических деформаций. Это приводит к приближению границы OL к условной плоско-

сти сдвига OA . При этом верхняя граница OM также приближается к условной плоскости сдвига OA , а толщина зоны деформации AOM резко уменьшается.

2. Исследование методом измерения микротвёрдости (Г.Д. Дель) [1, 2].

В процессе пластической деформации у большинства металлов происходит его упрочнение (наклёп, нагортовка), поэтому по величине твёрдости судят о степени пластической деформации на различных участках зоны стружкообразования. Эти исследования показывают, что самая большая степень деформации наблюдается в достаточно узкой области вблизи условной плоскости сдвига, а также непосредственно на обработанной поверхности (или поверхности резания) при резании инструментом, имеющим большой износ по задней поверхности и большой радиус округления режущей кромки.

3. Исследование методом конечных элементов (МКЭ).

При этом можно говорить о двух направлениях этих исследований. В первом направлении на основании экспериментальных исследований процесса резания в целом и зоны стружкообразования создаётся 3D модель заготовки в зоне резания и режущего клина инструмента, находящегося в контакте с заготовкой и стружкой. Вводятся данные о длине контакта стружки с передней поверхностью c , о длине пластического контакта c_1 , прилагается экспериментально определённое [1–5] или рассчитанное [6] распределение контактных напряжений на передней и задней поверхностях, распределение температуры в зоне стружкообразования и прилегающих областях, если таковые имеются, пусть только приблизительные. При этом предполагается, что рассматривается установившееся резание, поэтому температурные поля и распределение контактных напряжений по времени не изменяются.

При продвижении резца в срезаемом слое сначала возникают упругие деформации, которые увеличиваются по мере движения резца и перерастают в пластические в зоне первичных пластических деформаций. Увеличение пластической деформации до критической величины приводит к сдвигу небольшого объёма металла в зоне первичных пластических деформаций вдоль условной плоскости сдвига (рис. 2 и рис. 3). Образуется элемент стружки, затем другой и т. д. Все они двигаются вдоль передней поверхности до тех пор, пока на расстоянии c от режущей кромки не отделяются от передней поверхности.

Движению элементов стружки препятствует трение по передней поверхности, поэтому очень важно знать распределение (характер и величину на каждом участке) касательных контактных напряжений. Трение по передней поверхности придаёт дополнительную деформацию в области вторичных пластических деформаций. Вблизи режущей кромки на расстоянии от неё около $0,4–0,6$ длины контакта c прирезцовая поверхность стружки не перемещается, т. к. под действием адгезии она схватывается (приваривается) с поверхностью инструмента. Поэтому вышележащие слои стружки перемещаются вверх этого прилипшего слоя, осуществляя пластический сдвиг. В связи с этим принимается термин «зона вторичных пластических деформаций». Фиксируемое контактное напряжение на этом участке не может быть больше предела прочности на сдвиг обрабатываемого материала при действующей температуре и скорости деформации, что существенно усложняет его измерение при обычных испытаниях на сдвиг.

Исследования процесса стружкообразования и анализ шлифов корней стружки показывают [1, 2], что даже при образовании сливной стружки можно выделить маленькие элементы, которые под действием высокой температуры и давления плотно «свариваются» друг с другом, как это более отчётливо видно при образовании суставчатой стружки.

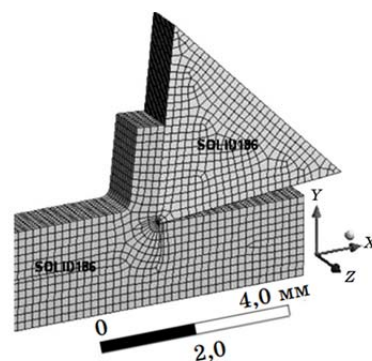


Рис. 3. 3D модель процесса строгания пластины с разбивкой на элементы SOLID 186 [8]

Наличие таких элементов при сливной стружке подтверждается зубчиками на внешней стороне стружки, хотя внутренняя (прирезцовая) гладкая и элементы практически не видны на боковой стороне сливной стружки.

Приложение нагрузок и малые перемещения резца со скоростью резания v позволяют рассматривать зону резания, разделённую на конечные элементы очень малых размеров, как статический объект с использованием программного обеспечения ANSYS.

При расчёте деформаций МКЭ принимаются граничные условия математической модели (см. рис. 3):

1) узлам, принадлежащим нижней и торцовой поверхности заготовки, запрещены всякие перемещения, т. е. рассматриваем как абсолютно жёсткое тело;

2) узлам, принадлежащим боковой поверхности заготовки, запрещены перемещения по оси OZ, т. е. допускаем отсутствие выпучивания обрабатываемого материала по боковым поверхностям;

3) узлам, принадлежащим поверхности заготовки на границе контакта с передней поверхностью резца, разрешены перемещения.

Задаются нормальные и касательные напряжения на поверхностях инструмента, после чего выполняется расчёт НДС в зоне стружкообразования.

Во втором направлении исследований МКЭ выполняется математическое моделирование, что позволяет выполнять исследование стружкообразования без проведения экспериментов [3–5, 7, 8]. Рассматривается процесс резания как деформация заготовки с заданными свойствами и закономерностями поведения.

Задаётся геометрия резца, внутри которой часто принимается отсутствие деформаций для уменьшения объёма вычислений. Задаются свойства заготовки и придаётся перемещение резцу. Программное обеспечение рассчитывает НДС зоны резания через определённые промежутки времени, задаётся моделирование (симуляция) деформаций и тепловыделений, происходящих в рассматриваемой зоне. Это наиболее сложный метод исследований.

Расчёт НДС зоны стружкообразования методом конечных элементов при строгании пластины из стали 45 с пределом текучести $\sigma_T = \sigma_{0,2} = 250$ МПа, коэффициентом линейного расширения $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, модулем упругости Юнга при 22 °С $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$; модулем объёмной упругости $1,666710^5$ МПа, модулем сдвига $7,6923 \cdot 10^4$ МПа твёрдосплавным резцом (ВК8) показал, что при врезании резца в заготовку у главной режущей кромки возникают существенные напряжения, которые увеличиваются по мере продвижения резца в направлении вектора скорости резания v .

Анализ картин распределения напряжений в этой области позволяет выделить участки с наибольшей величиной эквивалентных напряжений $\sigma_{e \max} = 256$ МПа (рис. 4) [8], которые располагаются в области условной плоскости сдвига (см. рис. 1, 2).

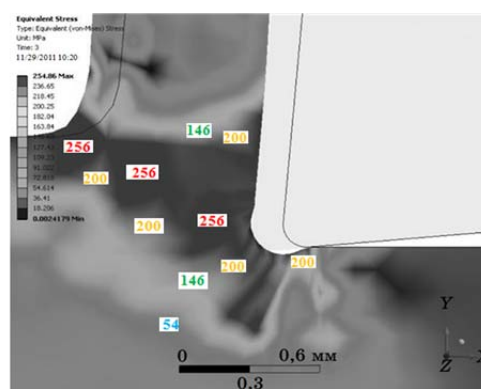


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в заготовке при строгании пластины [8] (обработка авторов)

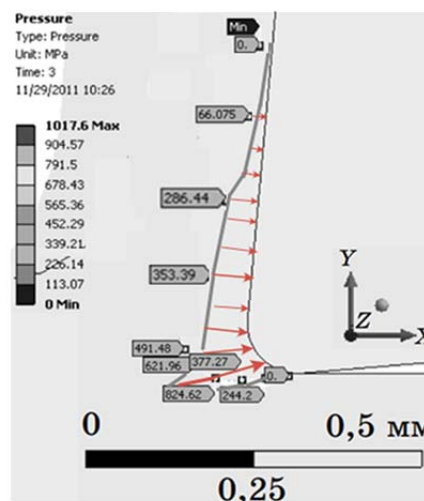


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений на передней поверхности [8] (обработка авторов)

На картине распределения эквивалентных пластических деформаций отчётливо видна область деформаций, совпадающая с условной плоскостью сдвига, но их величина $\varepsilon_e = 0,28865$ мм/мм существенно отличается от наибольшей относительной деформации $\varepsilon_{e \max} = 0,37112$ мм/мм, наблюдаемой в зоне резания.

Распределение нормальных напряжений на передней поверхности имеет сложный характер с наибольшей величиной у режущей кромки (см. рис. 5).

Пластическая деформация происходит только в зоне стружкообразования и на поверхности контакта с резцом, отчётливо видна область сдвига, совпадающая с условной плоскостью сдвига.

Результаты расчётов НДС показали возможность определить НДС заготовки и резца с использованием программного обеспечения ANSYS.

Выводы

1. Рассмотрена и описана физическая модель упругопластической деформации в зоне стружкообразования. Определены погрешности и ограничения, накладываемые геометрией режущего клина, свойствами и поведением материала при больших деформациях.

2. Описаны исследования по изучению процессов, возникающих при стружкообразовании на микроскоростях. Определены геометрические особенности зон деформации и сдвига, представлены методы оценки величины деформационных явлений.

3. Приведены данные о подходах, используемых для математического моделирования стружкообразования за счёт метода конечных элементов. На основании литературных данных рассмотрены закономерности поведения режущей кромки и обрабатываемого материала при резании. Описаны зоны распределения напряжений, возникающие при моделировании процесса резания.

Исследование финансировалось Российским научным фондом, проект № 23-79-10166.

Список литературы

1. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.

2. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М.Ф. Полетика – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.

3. Физические основы процесса резания металлов / под ред. В.А. Остафьева. Киев: Вища школа, 1976. – 136 с.

4. Армарего И.Дж.А. Обработка металлов резанием / И.Дж.А. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

5. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. Москва: Машиностроение, 2009. – 640 с.

6. Козлов В.Н., Дин Ц., Ли В. Исследование распределения контактных напряжений на передней поверхности инструмента при обработке стали // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22–25 ноября 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.]. –Томск: Томский политехнический университет, 2022. – С. 98–100;

7. Мокрицкий Б.Я. Моделирование процессов резания с применением программы ANSYS / Б.Я. Мокрицкий // Вестник машиностроения – 2018. – № 4. – С. 69–72.

8. Маслеников И.А., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Исследование напряжённого состояния зоны стружкообразования с помощью программного комплекса ANSYSWorkbench / Обработка материалов резанием, Санкт-Петербург: Политехника, 2012, № 5–6 (71–72). – С. 18–23.