

УДК 621.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СЛИВНОЙ СТРУЖКИ С УЧЕТОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ

С.В. Михайлов, А.П. Олейник

С помощью теоремы о разгрузке выполнен анализ влияния неоднородных по толщине стружки термомеханических напряжений на радиус кривизны стружки и длину контакта с передней поверхностью инструмента.

Завивание стружки как результат общего процесса стружкообразования проходит несколько стадий своего развития. Срезаемый слой металла, трансформируясь в стружку, поочередно пересекает области упругого деформирования, пластического течения, упругого разгрузки. Неоднородное напряженно-деформированное состояние в зонах первичной и вторичной деформаций приводит к тому, что стружка уже в начальный момент своего образования принимает криволинейную форму. При дальнейшем перемещении стружки вдоль передней поверхности инструмента уменьшение изгибающего момента от действия контактных напряжений вызывает перераспределение внутренних напряжений и изменение первоначальной кривизны стружки. За пределами контакта с резцом форма стружки может рассматриваться как результат двух противоположно действующих процессов –нагружения и разгрузки. Окончательная кривизна стружки будет определяться как разность кривизны стружки, возникающей в результате неоднородной деформации материала срезаемого слоя в зоне пластического течения, и величины изменения кривизны стружки, вызванного ее упругой деформацией при нагружении и разгрузке:

$$\frac{1}{r_n} = \frac{1}{r_{nl}} - \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{yn}} \right), \quad (1)$$

где r – радиус кривизны нейтральной оси стружки.

Данный уровень схематизации явления завивания стружки открывает возможность привлечения к исследованию рассматриваемого процесса основных законов теории упругости и пластичности.

В большинстве работ по резанию металлов процесс образования стружки рассматривается как процесс больших пластических деформаций на базе жесткопластической модели поведения материала. В этом случае при моделировании процесса завивания стружки упругой составляющей изменения ра-

диуса кривизны стружки пренебрегают [1, 2]. Согласно другой гипотезе, основной причиной завивания стружки считается упругая разгрузка стружки от действия внешних сил резания [3]. Вопрос о характере и степени влияния упругого деформирования стружки после прохождения ею участка пластического контакта на изменение радиуса кривизны имеет принципиальное значение как для понимания механизма завивания стружки, так и для его моделирования.

Необходимым условием искривления стружки при снятии действующей на нее нагрузки является неоднородная по толщине стружки упруго-пластическая деформация металла. О неравномерном напряженно-деформированном состоянии зоны резания свидетельствуют экспериментально установленные факты непостоянства по сечению стружки скорости деформации, степени деформации, температуры. Проведем количественную оценку величины изменения радиуса кривизны стружки при ее термомеханической разгрузке.

Механическую разгрузку стружки можно представить как нагружение балки в пределах упругости изгибающим моментом, по знаку обратным моменту при нагружении. Изменение кривизны стружки, на основании теоремы о разгрузке, может быть определено по формуле

$$\frac{1}{r_p} = \frac{M}{EJ}, \quad (2)$$

где M – изгибающий момент от действия внутренних нормальных напряжений, действующих вдоль оси стружки;

E – модуль упругости материала стружки;

$J = \frac{a_2^3 b_2}{12}$ – момент инерции площади поперечного сечения стружки относительно нейтральной поверхности;

a_2, b_2 – толщина и ширина стружки.

В пределах контакта с инструментом стружка находится в состоянии динамического равновесия. Неравномерные по толщине стружки внутренние напряжения уравновешены внешними силами, действующими со стороны передней поверхности инструмента. Из условия равновесия стружки изгибающий момент от действия внутренних термомеханических напряжений равен изгибающему моменту внешних контактных сил резания и направлен в противоположную сторону. Для контактных напряжений, распределение которых показано на рис. 1, величина изгибающего момента в любом сечении стружки равна:

при $0 \leq x \leq l_1$

$$M(x) = \frac{\tau_m b_2}{2} \times \left[\frac{l_2}{\mu} \left(\frac{l_2}{3} + l_1 - x \right) - \frac{l_2 a_2}{2} + (l_1 - x) \left(\frac{l_1 - x}{\mu} - a_2 \right) \right], \quad (3)$$

при $l_1 \leq x \leq l_1 + l_2$

$$M(x) = \frac{b_2 \tau_m (l_1 + l_2 - x)^2}{2 l_2} \times \left[\frac{1}{3 \mu} (l_1 + l_2 - x) - \frac{a_2}{2} \right], \quad (4)$$

где τ_m – максимальное касательное напряжение на передней поверхности инструмента;

l_2 – длина участка упругого контакта стружки с инструментом;

μ – коэффициент трения;

$$l_1 = l_0 - \frac{a_1 \sin(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1}. \quad (5)$$

Уменьшение изгибающего момента в удаляющихся от режущей кромки сечениях стружки свидетельствует о том, что процесс разгрузки стружки начинается на участке ее контакта с инструментом. При этом закономерность изменения кривизны стружки в процессе перемещения по передней поверхности резца описывается зависимостью

$$\frac{1}{r(x)} = \frac{1}{r_0} - \frac{M_{\max} - M(x)}{EJ}, \quad (6)$$

где M_{\max} – максимальное значение изгибающего момента.

Для контактных напряжений, показанных на рис. 1, M_{\max} равно

$$M_{\max} = \frac{\tau_m b_2}{2} \left[\frac{l_2 (l_2 + 3l_1)}{3 \mu} - \frac{l_2 a_2}{2} + l_1 \left(\frac{l_1}{\mu} - a_2 \right) \right]. \quad (7)$$

Расчеты показывают, что в результате снятия внешних сил стружка постепенно увеличивает радиус кривизны от r_0 на выходе из зоны первичной пластической деформации до r_n в конце участка контакта с инструментом. Можно предположить, что увеличение радиуса r в результате ее разгрузки за пределом зоны вторичной пластической деформации приводит к упругому скольжению стружки по передней поверхности инструмента. Согласно такой гипотезе длина упругого контакта стружки с резцом зависит от тех же параметров, что и r_p , т.е. от модуля упругости обрабатываемого материала, размеров сечения стружки и степени неоднородности напряженного состояния по толщине стружки. Завершение процесса разгрузки стружки соответствует моменту отрыва стружки от передней поверхности инструмента. После полной разгрузки радиус кривизны стружки принимает свое окончательное значение. Суммарное изменение кривизны стружки от действия разгрузки равно

$$\frac{1}{r_p} = \frac{M_{\max}}{EJ}. \quad (8)$$

Полученные уравнения были использованы для расчета величин r_0 и сравнения их значений с радиусами кривизны окончательно сформированной стружки. Результаты расчета и используемые для него экспериментальные данные сведены в таблицу 1.

Из таблицы видно, что для исследуемых условий резания изменения радиуса кривизны стружки в результате ее разгрузки не превышают 20 %. Решения, построенные с учетом предположения о треугольном законе изменения нормальных напряжений по передней поверхности инструмента, приводят к еще меньшим значениям изменения R_n от разгрузки.

Для полной оценки степени влияния упругой деформации изгиба стружки на его окончательную кривизну необходимо учесть долю упругих деформаций стружки, возникающих в начальный момент нагружения срезаемого слоя. Количественно определить влияние упругих составляющих деформации стружки при ее нагрузке на величину r_n проблематично. Однако достаточно очевидно, что суммарное изменение кривизны стружки с учетом ее нагрузки и разгрузки будет еще меньшей величиной, чем рассчитанное выше изменение кривизны стружки в результате ее разгрузки. При равенстве модулей упругости срезаемого слоя и стружки [4] различие изгибающих моментов, возникающих при упругой нагрузке и разгрузке M_{yn} и M_{max} (см. рис. 1б), зависит от степени упрочнения частиц материала срезаемого слоя в зоне пластического течения.

Механизм влияния неоднородного распределения температуры в зоне резания на деформацию и форму стружки можно представить следующим образом. Нагретые до высокой температуры прирезцовые слои стружки стремятся удлинить относительно свободных слоев на величину Δ (см. рис. 2). Менее нагретые внутренние слои стружки препятствуют этому удлинению, создавая в прирезцовых слоях напряжения сжатия. При интенсивном нагреве контактных слоев стружки напряжения в них превышают предел текучести, что вызывает дополнительную пластическую деформацию сжатия этих слоев. Во время охлаждения прирезцовые слои стремятся укоротиться, но не до первоначальной длины l , а больше – на величину пластического сжатия $\Delta_{сж}$. Препятствующие этому верхние слои стружки упруго сжимаются.

Учитывая большой температурный градиент по сечению стружки ($t_n \gg t_c$), примем величину относительного температурного сжатия прирезцовых слоев стружки равным (см. рис. 2б)

$$\Delta_{сж} = \Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = \alpha l(t_n - t_c), \quad (9)$$

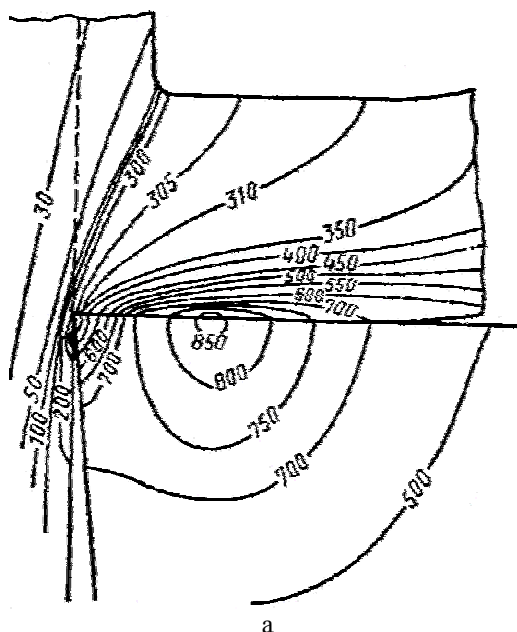
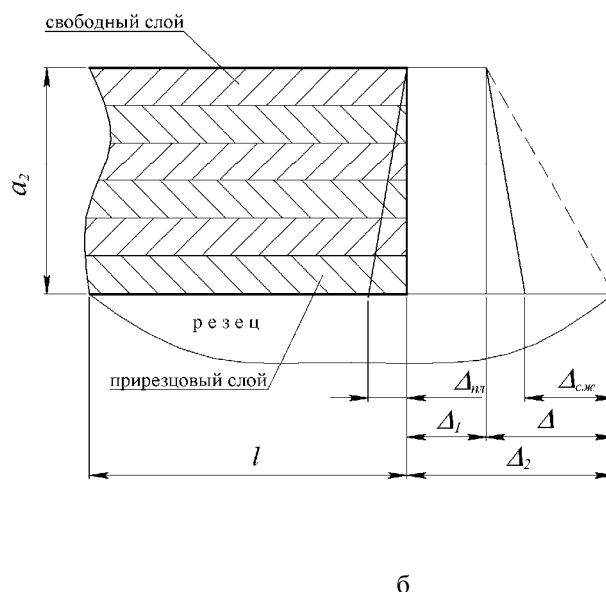


Рис. 2. Механизм влияния неоднородного распределения температуры в зоне резания на деформацию и форму стружки:

а – температурные поля при точении стали ШХ 15 резцом Т14К8 с $\gamma = 0^\circ$; $b_1 = 5,8$ мм; $a_1 = 0,35$ мм; $v = 80$ м/мин;

б – модель стружки



где α – коэффициент линейного расширения;

l – длина пластического контакта стружки с резцом;

t_n – температура прирезцового слоя;

t_c – температура внутренних слоев стружки.

Относительное сжатие прирезцовых слоев Δ включает упругие и пластические деформации (см. рис. 2 б):

$$\Delta_{сж} = \Delta_{упр} + \Delta_{пл}. \quad (10)$$

Величина $\Delta_{упр}$ определяется по закону Гука:

$$\sigma = \varepsilon_{упр} E, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{упр} = \Delta_{упр} / l$ – степень деформации;

E – модуль Юнга.

Решая уравнения (9)–(11) относительно $\Delta_{пл}$ получим:

$$\Delta_{пл} = l \left[\alpha(t_{\max} - t_{\min}) - \frac{\sigma_n}{E} \right], \quad (12)$$

где σ_n – предел пропорциональности обрабатываемого материала.

Укорочение прирезцовых слоев стружки при их остывании приведет к некоторому распрямлению стружки и увеличению радиуса ее завития R_n . Величина изменения радиуса кривизны стружки от температурных напряжений сжатия определяется по формуле:

$$\frac{R'_n}{R_n} = \frac{a_2(l + \Delta_{пл})}{a_2 l + R_n \Delta_{пл}}, \quad (13)$$

где R'_n – радиус кривизны стружки с учетом термомеханической разгрузки.

Анализ влияния термомеханической разгрузки стружки позволяет сделать следующие **ВЫВОДЫ**:

1. Основной причиной естественного заживания стружки является неоднородная пластическая деформация материала срезаемого слоя в зоне резания. Доля упругой составляющей изменения радиуса кривизны стружки незначительна.

2. Термомеханическая разгрузка стружки вызывает увеличение радиуса ее кривизны, что приводит к образованию упругого контакта струж-

ки с передней поверхностью инструмента. Расчеты показывают, что влияние температурной разгрузки стружки на ее форму незначительно. При остывании стружки ее радиус кривизны изменяется на величину, не превышающую 2–3%.

3. Длина упругого контакта стружки зависит от модуля упругости и предела пропорциональности обрабатываемого материала, размеров поперечного сечения стружки и радиуса ее кривизны в нормальной к передней поверхности инструмента плоскости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деверст П. О необходимости процесса резания / П. Деверст // Режущие инструменты. Экспресс-информация. – 1979. – № 38. – С. 1–8.
2. Джонсон У. Теория пластичности для инженеров : пер. с англ. / У. Джонсон, П. Меллор. – М. : Машиностроение, 1979. – 567 с.
3. Куфарев Г.Л. Физическая модель формирования сливной стружки при непрерывном резании / Г. Л. Куфарев // Вестник машиностроения. – 1981. – № 10. – С. 54–58.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1968. – 400 с.
5. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

S.V. Mikhaylov, A.P. Oleynik

MODELLING OF CONTINUOUS CHIP FORMATION PROCESS TAKING INTO ACCOUNT THERMO-MECHANICAL DUMPING