

жения у них окажутся связанными коэффициентом пропорциональности: $\sigma_{T1}/\sigma_{T2} = E_1/E_2$.

Для изучения напряженно-деформированного состояния в зоне резания при изменении параметра k_n проведено численно-математическое моделирование с помощью метода конечных элементов. Модель резания и базовое решение для $k_n = 3,75 \cdot 10^{-3}$ ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа и $\sigma_T = 750$ МПа) были описаны ранее [3]. Основные условия расчетов: скорость резания мала и поэтому тепловые и динамические эффекты не учитываются, антифрикционное покрытие резака идеальное; упругопластичный обрабатываемый материал неупрочняющийся; передний угол резака $\gamma = 0$; глубина резания $t = 0,2$ мм; радиус закругления режущей кромки $\rho = 0,06$ мм. В начальный момент резец находится в контакте с деталью по передней поверхности и закруглению режущей кромки. Моделируется врезание резака в металл. Перемещение инструмента $U = 0,01$ мм достаточно для стабилизации напряженного состояния в зоне резания [3]. Были выявлены три характерные области напряжений: область объемного сжатия перед режущей кромкой, передняя и задняя области растяжения.

В настоящем сообщении приведены расчетные данные, полученные при варьировании базового значения параметра k_n в 1/8 ... 8 раз для сталей при их нагреве или изменении структурного состояния при постоянном модуле упругости E путем изменения предела текучести σ_T от 93,75 до 6000 МПа, т. е. в 64 раза.

На рис. 1, а, б представлены картины главных напряжений σ_1 для материалов, имеющих крайние значения предела текучести. В структуре полей напряжений принципиальных изменений не произошло. В обоих случаях выявляются область объемного сжатия I, передняя и задняя области растяжения II, III. Однако точного подобия картин напряжений нет.

Для материала с $\sigma_T = 93,75$ МПа все три области напряжений явно выражены, имеют большую площадь и сравнительно далеко разнесены друг относительно друга. Область объемного сжатия покрывает всю зону стружкообразования. Передняя область растяжения отличается большими размерами. Ее

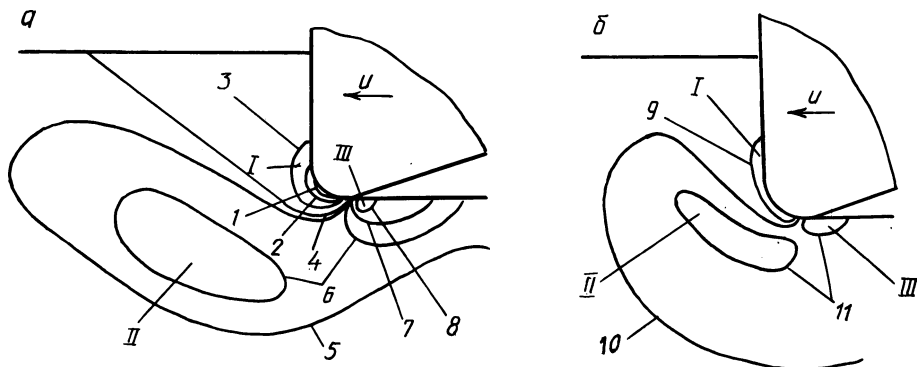


Рис. 1. Картины главного напряжения σ_1 в зоне резания для пределов текучести: а - $\sigma_T = 93,75$ МПа; б - $\sigma_T = 6000$ МПа; I - область объемного сжатия; II, III - передняя и задняя области растяжения; 1 - 87,5 МПа; 2 - 62,5; 3 - 37,5; 4 - 12,5; 5 - 12,5; 6 - 37,5; 7 - 62,5; 8 - 87,5; 9 - 800; 10 - 800; 11 - 2400 МПа

центр опускается на $\sim 0,4t$ ниже теоретической линии среза. В задней области растяжения действуют самые высокие напряжения.

Для материала с $\sigma_T = 6000$ МПа три характерные области напряжений сгруппированы вместе и имеют небольшие размеры. Область объемного сжатия представляет узкую полосу перед закруглением режущей кромки инструмента. Передняя и задняя области растяжения располагаются вблизи друг от друга и обнаруживают тенденцию к слиянию.

Снижение предела текучести для упругопластичного неупрочняющегося тела ведет в целом к уменьшению по абсолютной величине напряжений в зоне резания. Однако в отличие от жесткопластичного тела при этом для каждой точки в области деформаций уже не соблюдается постоянство отношений компонент тензора напряжений к σ_T . Так, при $\sigma_T = 6000$ МПа экстремальные напряжения σ_1 в области объемного сжатия, передней и задней областях растяжения соответственно равны $-1250, 3670$ и 3550 МПа, что составляет 21,61 и 59 % предела текучести. При $\sigma_T = 93,75$ МПа они составляют $-103, 69, 93$ МПа, что в отношении к пределу текучести дает 110, 74, 99 %. Таким образом, при снижении σ_T обнаруживается замедленное и неравномерное по зоне резания падение напряжений. Отношение действующих напряжений к пределу текучести увеличивается во всех трех характерных областях. Особенно выделяется область объемного сжатия, в которой отмечается относительный рост напряжений в 5,2 раза.

Сила резания падает с уменьшением предела текучести обрабатываемого металла. Для $\sigma_T = 6000$ МПа на 1 мм длины режущей кромки приходится усилие $P = 1304$ Н. Для материала с $\sigma_T = 93,75$ МПа $P = 28$ Н (в базовом решении $P = 212$ Н). Зависимость P от σ_T не является прямолинейной, как это должно было бы быть для жесткопластичного материала. Наибольшие нелинейные отклонения, превышающие 20 %, отмечаются в области высоких значений σ_T .

Изменение отношений σ_T/E существенно отражается на деформированном состоянии зоны резания. Картины интенсивности пластической деформации ϵ_i для предела текучести 93,75 и 6000 МПа приведены на рис. 2, а, б. Для меньшего значения σ_T оказывается характерной большая область пластических де-

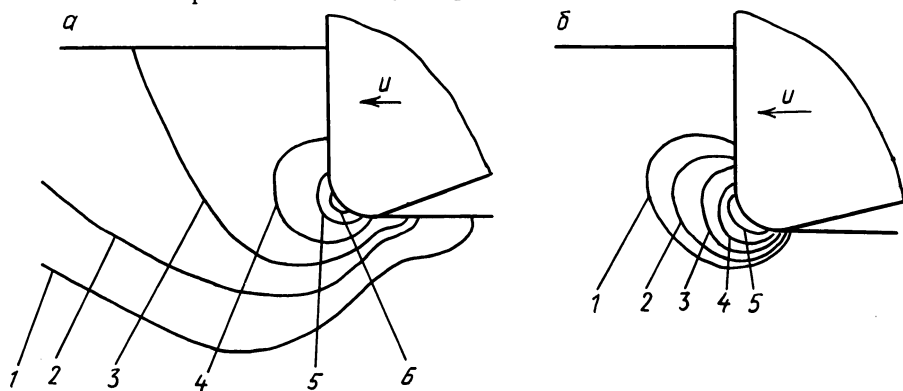


Рис. 2. Изолинии интенсивности пластической деформации ϵ_i в зоне резания для: а - $\sigma_T = 93,75$ МПа; б - $\sigma_T = 6000$ МПа; 1 - 0; 2 - 1; 3 - 2,5; 4 - 5; 5 - 10; 6 - 15 %

формаций в обрабатываемом металле. Граница пластического течения опережает резец на $3,2t$ и опускается ниже теоретической линии среза на $0,75t$. Позади резца происходит пластическое растяжение обрабатываемого металла, продолжающееся на расстоянии $0,9t$ от режущей кромки. Для $\sigma_T = 6000$ МПа велика доля упругих деформаций, и поэтому пластическое течение развито слабее. При врезании $U = 0,01$ мм пластические деформации концентрируются около режущей кромки и не могут выйти на свободную поверхность. Этот факт показывает, что обработка резанием деталей из высокоупругих материалов идет при неравномерной интенсивности пластического течения по толщине стружки. Не исключено также отсутствие в некоторых случаях сквозного пластического деформирования стружки. Полученные результаты дополняют известную модель условной плоскости сдвига, которая предполагает одинаковые сдвиговые деформации по всей длине зоны стружкообразования.

Глубина пластического течения материала ниже теоретической линии среза при $\sigma_T = 6000$ МПа не превышает $0,15t$. При этом пластические деформации не распространяются в металл позади резца. Расчеты во всем диапазоне изменения k_{II} указывают на общую закономерность: чем больше параметр k_{II} , тем компактнее область пластического течения в зоне резания.

Таким образом, изменение соотношения между характеристиками упругости и пластичности обрабатываемого металла – существенный фактор управления напряженно-деформированным состоянием в зоне резания.

Расчеты выявили чувствительность к отношению σ_T/E и самой конечноэлементной модели. Это выражается в увеличении с уменьшением k_{II} количества итерационных циклов, необходимых для решения пластической части задачи. При $\sigma_T = 6000$ МПа вычисления завершались после 9 итераций. В базовом варианте ($\sigma_T = 750$ МПа) потребовался 41 цикл, а для $\sigma_T = 93,75$ МПа – 64 итерации. При попытке решить задачу с $\sigma_T = 7,5$ МПа итерационный процесс не закончился даже после 180 циклов. Дело в том, что в математической модели используется так называемый метод начальных напряжений. Прежде всего находится упругое решение задачи. Затем вычисляется специальная дополнительная нагрузка – невязка сил. Далее по невязке сил с помощью глобальной матрицы жесткости рассчитываются дополнительные перемещения узлов конечных элементов. Суммирование дополнительных перемещений, получаемых рядом итераций, ведет к формированию искомого решения упругопластической части задачи.

Однако если предел текучести невелик, малой получается и невязка сил. В то же время глобальная матрица жесткости, контролируемая E , содержит большие коэффициенты. В результате вычисляемые на каждой итерации дополнительные перемещения оказываются незначительными, эффективность итераций падает и вычислительный процесс удлинняется. Многократное увеличение количества итераций нежелательно, так как это удорожает вычисления и ведет к накоплению машинных ошибок округления. Поэтому выявляется условие применимости данной конечноэлементной модели: параметр k_{II} должен быть заведомо больше $3,75 \cdot 10^{-5}$ ($\sigma_T = 7,5$ и $E = 2 \cdot 10^5$ МПа). -

Результаты расчетов подчеркивают важность совместного учета характеристик упругости и текучести обрабатываемого металла при моделировании процессов резания. Однако в механике резания из соображений простоты оперируют обычно не с упругопластичными, а с жесткопластичными модельными

материалами. Отказ от учета фактора упругости может привести к существенным искажениям в результатах решений.

Изменения в напряженно-деформированном состоянии, происходящие при варьировании отношения σ_T/E , позволяют предсказывать различия в структуре вновь образованной резанием поверхности металла. Чем меньше значение k_n , тем большей будет толщина деформированного поверхностного слоя. Для малых σ_T/E глубина прошедшего подповерхностного пластического течения сопоставима с глубиной самого резания. Поэтому в зависимости от k_n следует ожидать различий в картинах поверхностных остаточных напряжений, а для упрочняющихся материалов – и в распределениях микротвердости.

Особого внимания требует напряженно-деформированное состояние материала возле режущей кромки. Здесь происходит наиболее интенсивное деформирование металла. Вместе с тем, согласно расчетам, при высоких значениях σ_T/E область объемного сжатия мала и не может перекрыть всю зону сильного пластического течения. В результате пластические деформации идут в условиях растяжения, что стимулирует зарождение микротрещин. Металл из-под режущей кромки продвигается во вновь образуемый поверхностный слой и попадает под действие напряжений в задней области растяжения. Это может привести к дополнительному развитию микротрещин и затем к их катастрофическому росту. На процесс раскрытия развивающихся трещин способна оказать влияние передняя область растяжения, расположенная близко к режущей кромке. Соответствующие дефекты типа поверхностных трещин и вырывов известны в обработке металлов резанием [5]. Даже если при слабой области объемного сжатия обработанный металл и сохранит внешне свою целостность, то под вновь сформированной поверхностью могут остаться скрытые микро-разрушения, опасные для стадии эксплуатации детали.

При малом значении σ_T/E формируется мощная область объемного сжатия, защищающая деформируемый режущей кромкой металл от зарождения в нем микротрещин. Поэтому вновь образуемый поверхностный слой должен приобрести достаточную несущую способность. Как известно [4], сильное объемное сжатие позволяет проявиться упрочняющему действию пластической деформации, но блокирует сопутствующие процессы разрушения.

Изложенные положения согласуются с опытными данными. В эксперименте производилось низкоскоростное чистовое короткое резание цилиндрического образца $\Phi 16 \times 10$ мм из стали У10 путем его скальпирования в режущей матрице. Наблюдалось возникновение многочисленных трещин и вырывов, занимавших большую часть обработанной поверхности. Профилограмма детали представлена на рис. 3, а. Был использован прием предварительного подогрева образцов до 500°C . Это должно было привести к примерно двукратному понижению предела текучести [1] и одновременно к увеличению трещиностойкости обрабатываемого материала. Резание с подогревом используется для уменьшения нагрузок на резец и повышения его стойкости. В наших опытах благодаря указанному приему удалось избежать большинства поверхностных разрушений на образцах. Отдельные трещины появились лишь через 5...10 мм пути резца (рис. 3, б). На чистой поверхности обследованном на растровом электронном микроскопе с увеличениями до $\times 2000$ не обнаружено никаких нарушений сплошности металла. Достигнутый эффект можно объяснить благоприятными условиями деформирования в области объемного сжатия, когда



Рис. 3. Профилограммы скальпированной поверхности:

a — исходное состояние; *б* — предварительный подогрев до 500 °С; *в* — подогрев до 500 °С скоростью резания 530 м/мин (резание слева направо, вертикальное увеличение — $\times 500$, горизонтальное увеличение — $\times 20$)

одновременно повышается степень сжатия и увеличиваются за счет подогрева текучесть и ресурс пластичности металла. В результате деформированный, но малоповрежденный металл хорошо сопротивляется разрушению от действующих в задней области растяжения напряжений. Развитие отдельных микротрещин связано, по-видимому, с особыми дефектами структуры.

Для повышения степени размягчения металла в зоне резания эксперименты были продолжены на копре. Производилось ударное скальпирование со скоростями 190...530 м/мин при предварительном подогреве материала детали до 500 °С. Полная целостность вновь образованной поверхности (рис. 3, *в*) была достигнута при параметре шероховатости R_a не выше 0,06 мкм.

Таким образом, расчетные и экспериментальные результаты исследований показывают, что уменьшение параметра k_n обрабатываемого резанием металла, например путем нагрева, является перспективным средством повышения качества структуры и несущей способности поверхностного слоя деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А.П., Малинина К.А., Саверина С.М. Инструментальные стали. — М., 1975. — 272 с.
2. Чижиков Ю.М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением. — М., 1970. — 295 с.
3. Довнар С.С. Численно-математическая модель для определения напряжений, возникающих при обработке металлов резанием // Изв. АН БССР: Сер. физ.-техн. наук. — 1985. — № 2.
4. Механические свойства материалов под высоким давлением. Вып. 1—М., 1972. — 296 с.
5. Фельдштейн Э.И. Обрабатываемость сталей. — Л., 1953. — 256 с.

ПУТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Согласно системной модели, основными структурными компонентами способа обработки, определяющими его технико-экономические показатели, являются: метод обработки, способ формообразования поверхности и обрабатываемая система [1]. Такая структура обуславливает необходимость комплексного решения задач совершенствования известных и создания новых способов обработки. При этом важно исключить принципиальные ошибки при разработке технических решений, к которым в рассматриваемом случае можно отнести следующие.

Во-первых, выбор метода обработки, т. е. вида используемой энергии, способа ее подвода, технологической среды, механизма разрушения и схемы удаления с заготовки материала [1]. Важность этого этапа обусловлена тем, что метод обработки в основном определяет поток энергии в технологической системе и, следовательно, производительность способа обработки.

Во-вторых, выбор способа формообразования, т. е. характеристического образа и исходной поверхности инструмента, пространственной и временной схем формообразования обрабатываемой поверхности и его кинематики. Способ формообразования задает информационные связи способа обработки и в значительной мере определяет его универсальность, точность и производительность процесса формообразования.

В-третьих, определение и оптимизация кинематической схемы обработки, т. е. совокупности сообщаемых инструменту и заготовке абсолютных движений, присущих принятому методу обработки и способу формообразования. Кинематическая схема обработки является основой синтеза структуры станка.

В-четвертых, разработка обрабатываемой системы, т. е. станка, инструмента, приспособления. Обрабатываемая система обеспечивает заданные потоки информации, энергии и материалов и в конечном счете определяет технико-экономические показатели способа обработки.

Выделение указанных этапов обусловлено их качественным различием, однако решаемые на них задачи должны быть взаимосвязаны общей целью — созданием эффективного способа обработки. В частности, процесс формообразования нельзя рассматривать в отрыве от процесса резания. При выборе кинематической схемы обработки необходимо учитывать возможности ее реализации обрабатываемой системой. Последняя для эффективного использования возможностей метода должна проектироваться с учетом особенностей кинематики и динамики процесса резания. Несоблюдение этого условия ведет к снижению эффективности способа. Например, существенные преимущества ротационного точения часто не могут быть реализованы на универсальных токарных станках. С другой стороны, усовершенствование конструкции станка не компенсирует ошибок в выборе способа формообразования. Примером могут служить станки для обработки винтовых поверхностей переменного шага с неравномерным движением одного исполнительного органа [2], которым присуще значительное изменение скорости движения формообразования, что отрицательно влияет на производительность.