Лекция 6. Инструментальные материалы с износостойкими покрытиями

В мировой практике металлообработки все большее применение находят инструменты с покрытиями режущей части. Тонкие «пленочные» покрытия толщиной от 2 до 10 мкм наносят на поверхность заточенного и доведенного инструмента из быстрорежущей стали, твердого сплава и режущей керамики с целью изменения условий его работы при резании и улучшения эксплуатационных характеристик. Снижение сил и температур резания на 20–40 % позволяет повысить стойкость режущего инструмента в 2 и более раз или увеличить скорость резания от 20 до 60 %, а также значительно улучшить шероховатость обработанной поверхности.

К износостойкому покрытию для режущего инструмента предъявляется ряд требований:

1) высокая микротвердость, в 1,5–2 раза превышающая твердость инструментального материала;

2) значительное сопротивление к поверхностному усталостному разрушению;

3) низкая склонность к адгезии (химическому взаимодействию) с обрабатываемым материалом;

4) сохранение основных свойств при высоких температурах, стойкость против коррозии и окисления;

5) минимальная способность к диффузионному растворению в обрабатываемом материале;

6) высокая прочность сцепления с инструментальным материалом.

Некоторые из этих требований носят взаимоисключающий характер, например, низкая адгезия к обрабатываемому материалу и высокая прочность сцепления с инструментальным материалом.

При резании сплавов на основе железа инструментом из быстрорежущей стали, в основе которой также содержится железо, целесообразнее всего наносить многослойные или композиционные покрытия. У многослойных покрытий нижний слой, который прилегает к инструментальному материалу, обеспечивает крепкое сцепление с ним, а верхний – минимальное схватывание с обрабатываемым материалом. Промежуточные слои могут исполнять роль соединительных, слоев с тепловыми барьерами или слоев, препятствующих продвижению трещин при разрушении покрытий. Разновидностью многослойных покрытий являются градиентные покрытия. Например, для быстрорежущего инструмента состав покрытия

может постепенно переходить от нитрида циркония (ZrN), который обеспечивает наилучшее сцепление с инструментальной подложкой, к нитриду ниобия (NbN), который дает аномально низкое схватывание с железосодержащими обрабатываемыми материалами.

В качестве материалов для покрытий используют карбиды, нитриды, карбонитриды, бориды и силициды тугоплавких металлов IV–VI групп периодической системы элементов (IV – титан, цирконий, гафний; V – ванадий, ниобий, тантал; VI – хром, молибден, вольфрам). Применяются также сложные нитриды титана и алюминия (Ti, Al)N; нитриды тройных систем (Ti, Al, Zr)N, (Ti, Si, Cr)N, (Ti, Si, Al)N (Ti, Zr, Si)N; оксид алюминия Al_2O_3; углеродные (алмазоподобные) покрытия и другие соединения.

Наибольшее распространение для нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент получили методы химического осаждения из газовой фазы (ХОП) или методы CVD (Chemical Vapour Deposition), термодиффузионное насыщение поверхности (ТДН) и физическое осаждение из газовой фазы (ФОП) или PVD (Physical Vapour Deposition).

Опыт эксплуатации инструментов с покрытием позволяет определять условия, при которых достигаются наибольшее повышение их работоспособности. Инструменты из быстрорежущей стали с покрытиями показывают значительное повышение стойкости при разных видах обработки углеродистых, конструкционных и низколегированных сталей, а также серых чугунов низкой и средней твердости. При обработке титановых и жаропрочных сплавов на основе никеля, высоколегированных и высокопрочных сплавов эффективность от применения инструментов с покрытием существенно ниже, а в ряде случаев отрицательна.

Твердосплавные пластины с покрытиями из TiC, TiN, (Ti, Al)N эффективны для большинства самых распространенных видов обработки резанием конструкционных сталей и серых чугунов, особенно для точения, а также чистового и получистового фрезерования с умеренными подачами. При этом область применения твердых сплавов с покрытиями (в соответствии со стандартом ISO) намного шире, чем у аналогичных – без покрытия.

При тяжелых условиях резания, когда наблюдаются выкрашивание и скалывание на сплавах без покрытий, эффективность инструментов с износостойкими покрытиями снижается.

Результаты испытания пластин с разными покрытиями при обработке труднообрабатываемых материалов разных групп обрабатываемости показывают, что чем тяжелее обрабатывается материал резанием (чем

больше подгруппа обрабатываемости), тем меньше проявляется эффект от покрытия.

Необходимо отметить, что, невзирая на более высокую стоимость инструментов с покрытиями, расходы потребителя на обработку единицы продукции по сравнению с аналогичными расходами при применении непокрытых инструментов ниже благодаря повышению или стойкости инструмента, или скорости резания и производительности обработки.

В промышленно развитых странах выпуск твердосплавных режущих пластин с износостойкими покрытиями составляет 60–90 % от их общего выпуска, а из быстрорежущей стали с покрытием – около 70 % всех типов инструментов.

Лекция 7. Абразивные материалы и инструменты

Абразивная обработка – процесс формообразования материалов резанием множеством абразивных частиц (зерен). Это достаточно распространенный во всех сферах машиностроительного производства процесс. Так, на предприятиях автомобилестроения абразивными инструментами работают до 30 % станков, в подшипниковой промышленности – до 80 % станков. Ряд материалов (керамика, твердый сплав, изделия из природного камня) вообще не могут быть обработаны другими механическими методами.

Рабочие процессы абразивной обработки характеризуются видом применяемого инструмента или среды, материалом абразивных частиц и кинематикой рабочих движений. *Основным принципом обработки является направленное абразивное* (*механическое*) *изнашивание материала заготовки в результате режущего или царапающего воздействия более твердыми частицами инструмента***.**

По назначению все процессы абразивной обработки принято делить на обдирочное, черновое, чистовое шлифование и отделочные методы.

• ***Обдирочное* (*силовое*) *шлифование*** применяют при обработке поверхностей, которые имеют значительные отклонения формы, большую глубину дефектного слоя. При этом производительность обработки может достигать до 5 кг/мин.

• ***Черновое шлифование*** выполняют под последующую чистовую обработку или при обработке поверхностей, к которым не предъявляются высокие требования по точности и шероховатости (точность обработки 8…10 квалитет и R_a = 2,5…6,3 мкм).

• ***Чистовое шлифование*** используют как окончательный метод обработки или под последующую отделочную обработку поверхностей (точность обработки 6…8 квалитет и шероховатость поверхности R_a = 0,16…1,25 мкм).

• ***Отделочно-абразивные методы*** применяют с целью повышения точности обработки, снижения шероховатости поверхности, улучшения физико-механических свойств поверхностного слоя. К ним относятся: тонкое шлифование, хонингование, суперфиниширование, доводка, абразивная обработка гибкими лентами и лепестковыми кругами, полирование, виброабразивная, магнитно-абразивная, полирование уплотненным потоком абразива и др. При этом обеспечивается получение точности от 5…6-го квалитетов и шероховатости поверхности R_a = 0,04…0,16 мкм (тонкое шлифование) до 3…5-го квалитетов и шероховатости поверхности R_a = 0,04…0,16 мкм (притирка).

Абразивный инструмент представляет собой систему взаимосвязанных абразивных (дисперсных) частиц. По агрегатному состоянию дисперсионной среды можно выделить следующие классы абразивных инструментов.

• ***Твердодисперсные*** – с фиксированным расположением абразивных зерен в связке или на основе инструмента. Инструмент может быть монолитным, многослойным или однослойным (инструмент на гальванической связке, шлифовальные ленты и шкурки). Он может иметь жесткую (инструмент на гальванической связке) или гибкую основу (шлифовальные ленты и шкурки). В зависимости от материала связки инструмент бывает жестким (керамическая, бакелитовая, металлическая) или упругим (вулканитовая, полиуретановая). Возможно включение дополнительных дисперсных фаз: поры (абразивный инструмент), частицы твердой смазки, наполнитель (алмазно-абразивный инструмент).

• ***Жидкодисперсные*** (суспензии, золи) – абразивные частицы находятся в жидкости при доводке, притирке, полировании, вибро-абразивной, ультразвуковой, струйно-абразивной обработке.

• ***Газодисперсные*** (пыль) – абразивные частицы увлекаются газовой или воздушной средой при вибро-абразивной, струйно-абразивной обработке,

Жидкодисперсные и газодисперсные системы относятся к процессам обработки условно свободным абразивом и представляют собой абразивные среды. Возможна их комбинация, например, пескоструйная обработка.

Все абразивные материалы делятся на две группы: естественные (природные) и искусственные (синтетические).

Естественные материалы (кремень, наждак, корунд, гранат, алмаз и др.) не получили широкого применения в абразивных инструментах из-за нестабильности режущих свойств и высокой стоимости. Иногда для процессов полирования и доводки используются: пемза, полевой шпат, крокус, мел, тальк, каолин, венская известь.

Искусственные абразивные материалы делятся на две группы: обычной твердости (электрокорунд, карбид кремния, карбид бора) и сверхтвердые – синтетический алмаз и сверхтвердые поликристаллические нитриды бора (СПНБ). СПНБ выпускаются под следующими торговыми марками: гексанит, кубонит – Украина; эльбор – Россия; белбор – Беларусь; борозон (borozon) – США; CBN – Япония, Китай и др.

Сырьем для производства искусственных абразивов служат руды и минералы, содержащие большое количество твердых кристаллов, таких как оксид алюминия (Al_2O_3) и кварц (SiO_2). Сверхтвердые абразивные материалы получают в результате синтеза при сверхвысоком давлении и температуре из графита (синтетический алмаз) и гексагонального (вюрцитоподобного) нитрида бора с последующим дроблением шихты, очисткой и рассевом.

Электрокорунд представляет собой кристаллический оксид алюминия Al_2O_3, являющийся очищенным продуктом плавки глинозема (бокситов). Различают несколько видов электрокорунда: нормальный, белый, хромистый, титанистый, монокорунд и сферокорунд.

Электрокорунд нормальный (марки: 16А, 15А, 14А, 13А, 12А) наиболее широко используется в промышленности. Применяется при черновом, получистовом и чистовом шлифовании сталей и чугунов, а также для заточки режущего инструмента из инструментальной стали.

Электрокорунд белый (марки: 25А, 24А, 23А, 22А) содержит меньше примесей, поэтому превосходит по своим режущим свойствам электрокорунд нормальный. Он применяется при шлифовании прочных и вязких сталей (незакаленных и закаленных), ковкого чугуна, заточки инструментов из быстрорежущей стали.

Электрокорунд хромистый (34А, 33А, 32А) получают при плавке в электропечах глинозема с добавлением хромистой руды. Зерна его имеют розовую окраску. В нем содержится не менее 97 % $A1_2O_3$ и до 2 % CrO.

Электрокорунд титанистый (37А) содержит не менее 97 % Al_2O_3 и 2 % TiO_2.

Высокая вязкость зерен электрокорунда хромистого и титанистого создают предпосылки для их использования при напряженных режимах шлифования углеродистых и конструкционных сталей, а также для высокоточных работ и доводочных операций.

Монокорунд (45А, 44А, 43А) отличается высокой прочностью и режущими свойствами, содержит 97…98 % $A1_2O_3$. Применяется для обработки весьма прочных сталей, ковкого чугуна, быстрорежущей стали.

Сферокорунд – абразивный материал, получаемый из глинозема в виде полых корундовых сфер. В нем содержится более 99 % Al_2O_3 и небольшое количество примесей. Он находит применение при шлифовании мягких, вязких и специфичных материалов – кожи, резины, древесины, пластмасс, цветных металлов. Иногда используется в качестве порообразователя.

Формокорунд содержит 80…87 % $A1_2O_3$ и Fe_2O_3 не более 1,5 %. Производится в виде зерен цилиндрической (С) и призматической (Р) форм с размерами: диаметр или ширина квадратного сечения 1,2…2,8 мм, длина 3,8…8 мм. Преимущественно используется в основном для тяжелых
обдирочных работ.

Карбид кремния (SiC) выпускается двух видов: черный – марок 52С, 53С, 54С, 55С (95…98 % SiC) и зеленый – марок 62С, 63С, 64С (98…99 % SiC).

Более качественным (и дорогим) является зеленый карбид кремния. Он применяется для заточки твердосплавного инструмента. Черный карбид кремния хрупок и используется для обработки материалов с низким пределом прочности (чугуна, бронзы), вязких металлов и сплавов (мягкой латуни, алюминия, меди), а также для обработки таких неметаллических материалов, как кожа, стекло, мрамор и т. д.

В настоящее время для упрощения используют обозначения карбида кремния зеленого и черного соответственно 6С и 5С, электрокорунда белого – 2А и т. д.

Карбид бора (B_4C) – состоит из кристаллического карбида бора (84…93 %) и небольшого количества примесей. По твердости и абразивной способности уступает только сверхтвердому нитриду бора и алмазу. Применяют в основном для приготовления паст и суспензий для доводки и полирования твердых материалов. Может использоваться для доводки твердосплавного инструмента, так как обеспечивает минимальный радиус кривизны режущей кромки лезвия – до 6...10 мкм (электрокорунд – до

15 мкм), а также при обработке весьма твердых материалов, например рубина, корунда, кварца и др.

Окись алюминия (Al_2O_3 – глинозем). Пасты на его основе используются для притирки и доводки стальных и чугунных деталей.

Окись железа (Fe_2O_3) – мелкий однородный полировальный порошок коричневого цвета (крокус). Применяется для полирования стекол, благородных и цветных металлов.

Окись хрома (Cr_2O_3) – твердый тонкокристаллический абразивный материал темно-зеленого или почти черного цвета. Является наиболее эффективным материалом, применяемым для изготовления полировальных паст.

Одной из важнейших характеристик абразивных материалов есть ***зернистость***.

По зернистости абразивные материалы делятся на следующие группы: шлифзерно – 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16; шлифпорошки – 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3; микропорошки – М63, М50, М40, М28, М20, М14; тонкие микропорошки – М10, М7, М5. Это условное обозначение шлифовального материала, соответствующее размеру абразивных зерен (крупности) основной фракции. ***Основной фракцией*** называется совокупность зерен определенного размера, преобладающих в составе данного порошка по массе (в шлифзерне и шлифпорошках) или по числу зерен (в микропорошках).

Зернистость шлифзерна и шлифпорошков определяется размером стороны ячейки нижнего контрольного сита для основной фракции (в сотых долях миллиметра). Например, шлифзерно 200 при просеивании остается на сите с номинальными размерами ячеек сетки на просвет, равными 2000 мкм.

Номер зернистости микропорошков обозначается цифрой, равной наибольшему размеру (в мкм) зерен основной фракции с добавлением буквы М. Например, микропорошок с размерами основной фракции 14–10 мкм обозначается М14.

В общем случае алмазный порошок – это совокупность кристаллов и поликристаллов размером не более 3000 мкм.

Алмазные порошки принято разделять на четыре основные группы: шлифпорошки (с размером зерен 2500...60 мкм), микропорошки (60...1 мкм), субмикропорошки (1...0,1 мкм) и нанопорошки (10^{-3}...10^{-4} мкм).

Обозначение марок алмазных шлифпорошков состоит из буквенных и цифровых индексов. Буквами АС обозначаются порошки из синтетических монокристаллических алмазов (буквой А – природный алмаз), АР –

из синтетических алмазных поликристаллов. При этом к индексу АР добавляется буква, обозначающая тип исходного природного поликристаллического алмаза: В – баллас, К – карбонадо, и спеков – С. К буквенным обозначениям добавляется цифровой индекс, выражающий для порошков АС значение прочности на сжатие (не менее) в ньютонах, а в шлифпорошках АР – в сотых долях ньютона.

Шлифпорошки синтетических монокристаллических алмазов выпускаются в Украине 12 марок прочности (ДСТУ 3292-95), начиная с АС2 (4, 6, 15, 20, 32, 50, 65, 80, 100, 125) до АС160. Если порошок дополнительно рассортирован по какому-либо отличительному свойству, после цифрового индекса добавляется соответствующий индекс: Т – термопрочные (термостойкие); Н – немагнитные, неэлектропроводные; А – повышенной адсорбционной активности и др.

В ИСМ НАН Украины разработаны и производятся порошки повышенной прочности марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400 (ТУ 88.090.029-98). Данные порошки применяются: в инструментах на металлических связках; в правящих инструментах; в инструментах для резания, сверления природного камня, керамики, бетона и буровых работ (АС200, АС250, АС300); в инструментах для обработки природного камня, стройматериалов, горных пород повышенной твердости (АС350, АС400).

Микропорошки нормальной абразивной способности, которые обозначаются индексом АСМ (алмазный синтетический микропорошок) и порошки повышенной абразивной способности – индексом АСН, выпускаются зернистостью от 60/40 до 1/0 мкм.

Зернистость шлифпорошка из СТМ определяется и характеризуется размером зерен основной фракции и обозначается дробью, числитель которой соответствует размеру ячеек верхнего сита, а знаменатель – размеру ячеек нижнего сита, на которых остаются зерна рассеиваемой фракции, образуя массу порошка определенной зернистости, например, 400/315. Цифры соответствуют размерам ячеек сит в мкм.

Для обозначения субмикропорошков к буквенным индексам добавляется цифра 5 или 1, обозначающая содержание в порошке зерен крупной фракции (соответственно не более 5 или 1 %). Субмикропорошки выпускаются 6 зернистостей: АСМ5 1/0,5 (0,7/0,3; 0,5/0,1) и АСМ1 0,5/0 (0,3/0; 0,1/0).

Для получения микро и субмикропорошков специального назначения применяют различные методы модифицирования их поверхности. В этом случае к основным индексам добавляются новые: О – овализованные,

Д – диамагнитные, Ф100 – гидрофобизированные, Ф700 – гидрофилизированные и др.

Ультрадисперсные алмазы (УДА, наноалмазы) с размером частиц 1...100 нм синтезируются путем детонации заряда взрывчатого вещества в специальных камерах в среде с отрицательным кислородным балансом. В настоящее время уже известно, что добавки УДА в различные материалы способствуют формированию мелкозернистых структур с принципиально новыми свойствами.

Кубический нитрид бора (КНБ) является более термостойким материалом, чем алмаз и, как правило, применяется там, где не может использоваться алмаз, т. е. при больших нагрузках, высокой температуре и в физико-химической активной среде.

В Украине шлифпорошки КНБ (кубонита) с размерами зерен от 250 до 40 мкм производятся трех марок: обычной (КО), повышенной (КР) и высокой (КВ) прочности.

Основной характеристикой микропорошков из кубонита (КМ) является повышенная абразивная способность. Диапазон зернистостей такой же, как и алмазов, т. е. от 60/40 мкм до 1/0 мкм.

На практике абразивный инструмент подразделяют на три основных вида:

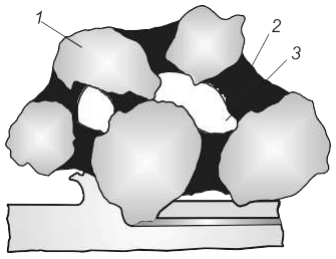


Рисунок 2.2 – Структура абразивного инструмента

• инструмент на жесткой основе, в котором зерна *1* шлифовальных материалов (рис. 2.2) жестко закреплены между собой связкой *2* (керамической, органической, металлической и т. п.);

• инструмент, изготовленный на гибкой основе (фибра, бумага, ткань или их комбинация, нетканый материал) – шлифовальная шкурка и изделия из нее (бесконечные шлифовальные ленты, ленты, бобины, конусы, диски, лепестковые круги) и другой гибкий или эластичный абразивный инструмент;

• пасты твердой и жидкой консистенции, представляющие собой композицию из шлифовальных материалов и органических связующих, закрепляющих абразивные зерна так, что при работе они имеют значительную свободу перемещений в зоне обработки с включением в состав также смазывающих и поверхностно-активных веществ.

Наибольшее распространение получил инструмент на жесткой основе:

• шлифовальные круги – абразивные инструменты в виде тела вращения цилиндрической или специальной формы;

• шлифовальные головки – шлифовальные круги различных форм и размеров с глухими отверстиями для крепления на металлических хвостовиках-оправках;

• шлифовальные сегменты, являющиеся составной частью сборного или составного шлифовального круга;

• шлифовальные бруски призматической или цилиндрической формы, используемые для изготовления хонов или суперфинишных головок;

• шлифовальные шеверы – абразивные инструменты, имеющие форму зубчатого колеса, используемые для финишной обработки зубчатых колес;

• абразивные галтовочные тела, представляющие собой призмы, звездочки и другие произвольные геометрические формы, используемые для виброабразивной обработки в галтовочных барабанах.

По своим формам или профилю шлифовальные круги подразделяются на 13 типов: прямого (цилиндрического) или конического профилей, в виде колец, чашек, тарелок, со специальными выточками и т. д. Кроме того, правкой может быть обеспечен любой другой специальный профиль, необходимый для конкретной операции шлифования.

Помимо типа и размеров характеристика шлифовального круга включает в себя: материал и марку абразива, его зернистость, твердость и номер структуры круга, тип и марку связки. Особенностью алмазно-абразивного инструмента является наличие характеристики – концентрации алмазных зерен и отсутствие характеристик – твердость и номер структуры. В состав характеристики входят также рабочая скорость инструмента, его степень точности и класс неуравновешенности масс.

Твердость абразивных инструментов – это условное обозначение способности связки удерживать зерна в инструменте. Установлена следующая шкала степеней твердости абразивных инструментов: ЧМ1, ЧМ2 – чрезвычайно мягкий; ВМ1, ВМ2 – весьма мягкий; М1…М3 – мягкий; СМ1, СМ2 – среднемягкий; С1, С2 – средний; СТ1…СТ3 – среднетвердый; Т1, Т2 – твердый; ВТ1, ВТ2 – весьма твердый; ЧТ1…ЧТ9 – чрезвычайно твердый. Здесь цифры 1, 2…9 характеризуют твердость в порядке ее возрастания. Для инструментов на вулканитовой связке применяют укрупненные степени твердости: СМ, С, СТ, Т.

В большинстве случаев шлифования применяют абразивные круги средней степени твердости, которые обеспечивают высокую производительность и достаточную стойкость. При бесцентровом, внутреннем и плоском шлифовании применяют более мягкие круги, а при профильном

шлифовании, резьбошлифовании, шлифовании прерывистых поверхностей и заготовок малых диаметров используют более твердые круги. Шлифование с СОЖ выполняют более твердыми кругами.

Связка абразивных инструментов служит для скрепления зерен в объемную структуру заданной формы, обеспечивая их удержание до момента достижения критической степени изнашивания. Она оказывает большое влияние на работоспособность кругов. От количества, вида, качества и равномерности распределения связки в абразивном круге зависят твердость, прочность, структура, неуравновешенность круга и допускаемая скорость шлифования.

Для изготовления абразивных кругов применяют неорганические (керамические – К, силикатные – С, магнезиальные, металлические – М) и органические (бакелитовые – Б, вулканитовые – В, глифталевые – Гф, полимерные) связки. Из них наиболее распространены керамическая, бакелитовая и вулканитовая связки, а при производстве алмазного инструмента – бакелитовая и металлическая связки.

Номер структуры абразивного инструмента характеризует соотношение между объемами зерен *1* ($V_з$), связки *2* ($V_с$) и пор *3* ($V_п$): $V_з + V_с + V_п = 100$ % (см. рис. 2.2). Абразивный инструмент по структуре разделяют на 12 групп от 1 до 12.

С повышением номера структуры на единицу содержание абразивных зерен уменьшается на 2 %. Структуры № 1…4 называются закрытыми или плотными, № 5…8 – средними, № 9…12 – открытыми. Общие рекомендации таковы: № 1…4 – профильное шлифование; № 5…8 – обычное шлифование; № 9…12 – скоростное шлифование, обработка мягких неметаллических материалов.

Концентрация зерен алмазных и кубонитовых кругов является условной характеристикой амазоносного слоя. За концентрацию 100 % принимают 4,4 карата в 1 см^3 (8,8 г/см^3), что составляет 25 % (по объему).

С увеличением концентрации повышается режущая способность и стойкость кругов, но и растет их стоимость. Для окончательного шлифования и доводки рекомендуются круги 100 % и 150 % концентраций, а для профильного шлифования и заточки твердосплавных инструментов 150...200 % концентрации.

Тема 3
ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Лекция 1. Некоторые сведения о пластической деформации металлов

Основным признаком процесса пластической деформации материала является необратимое изменение формы тела под действием внешних сил без нарушения сплошности деформируемого тела.

Все металлы и их сплавы состоят из множества отдельных зерен кристаллов (кристаллитов), прочно соединенных между собой. При механическом воздействии на металл в его зернах возникают напряжения, под влиянием которых зерна деформируются, т. е. вытягиваются в одном направлении и сужаются в другом. Деформация металлических зерен протекает путем сдвигов, происходящих по плоскостям скольжения, расположенным параллельно определенной кристаллографической плоскости.

Каждая полоса скольжения – это локальная область материала с повышенной плотностью определенным образом ориентированных и взаимосвязанных дислокаций. Движение полосы скольжения обеспечивает пластическую деформацию, интенсивность которой в объеме материала возрастает с увеличением количества таких полос. В полосах скольжения в процессе своего движения дислокации встречают препятствия (например, частицы выделения, границы зерен и др.). Остановка дислокации у препятствия является причиной упрочнения материала. Потому для дальнейшего продвижения дислокации необходимо увеличение приложенной нагрузки.

При больших степенях деформации структура металла в виде системы полос скольжения трансформируется в характерную ориентированную структуру, называемую текстурой (рис. 3.1).

Различают три основных вида деформированного состояния малого объема тела.

1. Растяжение (рис. 3.2 *а*).

2. Сжатие (рис. 3.2 *б*).

3. Сдвиг (рис. 3.2 *в*). При ***чистом сдвиге*** (рис. 3.3 *а*) происходит равномерное укорочение вдоль одной оси и равномерное удлинение вдоль другой оси, перпендикулярной к первой. ***Простой сдвиг*** (рис. 3.3 *б*) сопровождается смещением всех точек тела параллельно одной оси на расстояние, пропорциональное расстоянию точки тела от этой оси в направлении второй оси.

Процесс резания пластичных материалов чаще всего сопровождается ***деформацией простого сдвига*** (см. рис. 3.3 *б*).

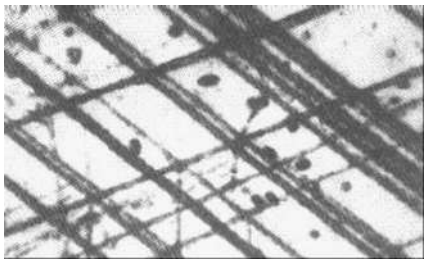


Рисунок 3.1 – Дислокационные полосы скольжения (текстура) в стали (×200)

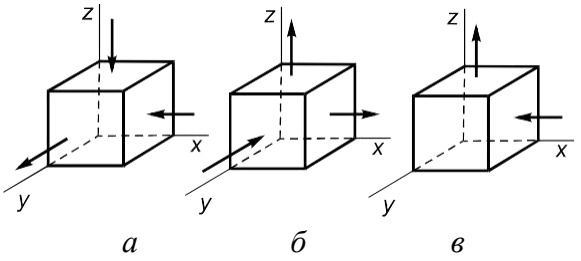


Рисунок 3.2 – Три основных вида деформированного состояния

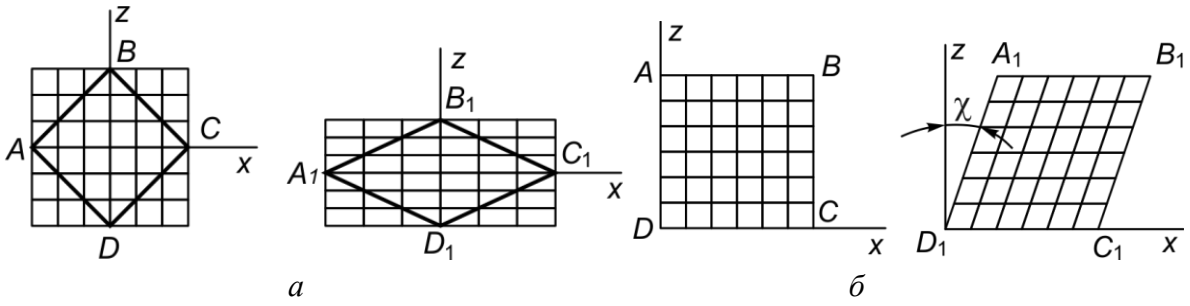


Рисунок 3.3 – Схемы деформации чистого и простого сдвигов

Вопросам изучения зоны стружкообразования при обработке различных материалов уделяется большое внимание. Все существующие способы исследования можно условно разделить на следующие группы:

- экспериментальные, исследующие непосредственно процесс резания;
- экспериментальные, исследующие зону стружкообразования прямыми методами;
- экспериментальные, исследующие зону стружкообразования путем физического моделирования;
- расчетно-аналитические (математическое моделирование или симуляция).

Непосредственное исследование зоны резания можно осуществить визуально при микроскоростях резания, используя специальные микроскопы; с помощью скоростной (с частотой до 10 000 кадров в секунду) кино- или видеосъемки зоны резания. Для большей информативности на полированную боковую поверхность заготовки наносится координатная сетка с постоянным шагом. Используя аппарат математической теории пластичности, по размерам искаженной после обработки делительной

сетки можно оценить положение зоны деформации, закономерности формирования стружки и другие факторы (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Искажение координатной сетки в результате деформации

Зону стружкообразования при резании можно оценить также, анализируя образец, полученный после ***мгновенной остановки процесса резания*** с помощью специальных устройств. Из полученного образца, называемого «***корень стружки***», изготовляют микрошлиф, который рассматривают под микроскопом при увеличении в 25–200 раз или делают микрофотографию. Изменение структуры материала стружки и зоны деформации по сравнению со структурой недеформированного материала, направление текстуры позволяют установить границы зоны деформации и судить о деформационных процессах, в ней происходивших (рис. 3.5).

«Корни стружек» могут изучаться и на образцах с нанесенной делительной сеткой с ячейками круглой или квадратной формы (рис. 3.6).

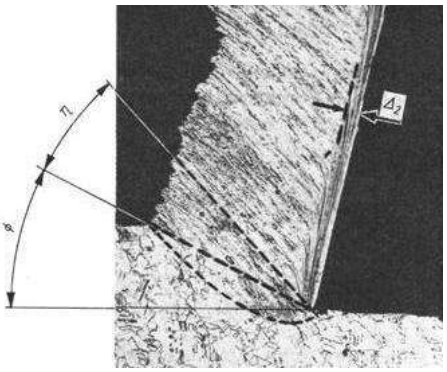


Рисунок 3.5 – Микрошлиф «корня стружки»

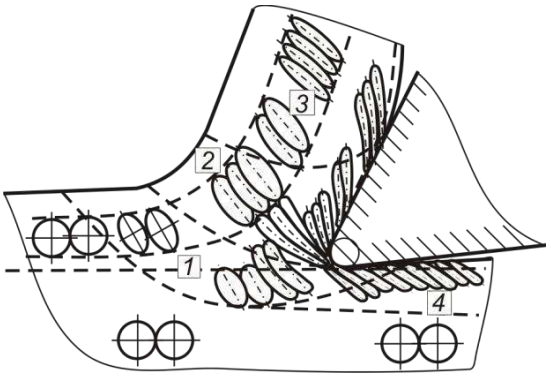


Рисунок 3.6 – «Корень стружки» с координатной сеткой

К первой группе можно также отнести и ***способ выявления линий скольжения.*** Боковая поверхность «корня стружки» подвергается травлению, и линии скольжения при этом выявляются в виде темных полос. Разновидностью способа является нанесение на торце заготовки оксидной пленки, достаточно прочно связанной с основным металлом. Оксидная пленка отделяется от поверхности, в результате чего на поверхности возникают линии скольжения, по которым можно определить направление сдвига.

К группе физического моделирования можно отнести ***поляризационно-оптический способ и способ лазерной интерферометрии.*** Поля-

ризационно-оптический метод или метод фотоупругости основан на том, что прозрачные изотропные тела при действии на них внешних сил становятся анизотропными, и, если их рассматривать в поляризованном свете, то интерференционная картина позволяет определить величину и знак действующих напряжений. В результате нагружения в поляризованном свете по картине полос (рис. 3.8) можно определить главные напряжения, деформации и их направление. Однако метод дает точные величины нормальных и касательных напряжений только в упругой области, в то время как в зоне резания происходит значительная пластическая деформация, изменяющая распределение напряжений. Поэтому с помощью поляризационно-оптического метода можно получить только качественное и приближенное представление о распределении напряжений в зоне деформации.

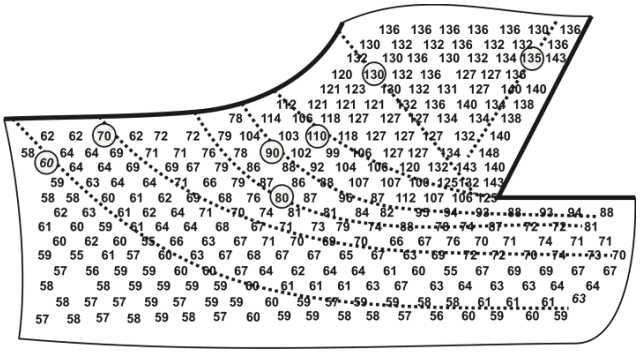


Рисунок 3.7 – Расположение точек (линий) равной твердости на «корне стружки»

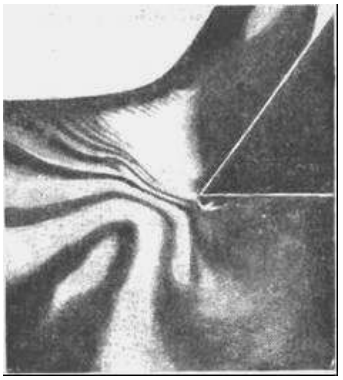


Рисунок 3.8 – Картина напряжений в оптически активном материале

При использовании ***способа лазерной интерферометрии*** полированную зеркальную боковую поверхность режущего инструмента освещают пучком когерентного монохроматического излучения от оптического квантового генератора. Интерференционную картину, характеризующую деформации инструмента в текущий момент времени, формируют между опорным и отраженным от поверхности инструмента лучами. Кинокамера фиксирует изменение интерференционных полос ненагруженного и нагруженного деформированного инструмента, по которым судят о величине действующих напряжений.

К указанной группе можно отнести также ***электро-тензометрический способ***, когда на поверхность детали наклеивают тензометрические датчики и по их показаниям после приложения нагрузки фиксируют напряжения и их знак.

Способы математического моделирования позволяют определить параметры стружкообразования без проведения экспериментальных

исследований. Они основаны на том, что процесс резания представляют как процесс деформации тела с определенными свойствами и закономерностями поведения.

Лекция 2. Типы стружек при резании пластичных и хрупких материалов

Перечисленными выше способами исследований было установлено, что резание представляет собой очень сложную саморегулирующуюся систему, которая мгновенно реагирует на изменение любого параметра процесса изменением всей картины. Первым проявлением такой реакции являются разные типы стружек, которые образуются в результате резания. Этот факт был установлен еще в ходе первых опытов И. А. Тимме в 1870 г., и тогда же была дана классификация типов стружек, которая оказалась настолько удачной, что ею пользуются и в настоящее время. Согласно исследованиям И. А. Тиме, при резании конструкционных материалов в любых условиях существуют два способа преобразования срезаемого слоя в стружку:

- за счет сдвиговых деформаций, происходящих при воздействии передней поверхности инструмента на срезаемый слой (стружки сдвига);
- в результате отрыва элемента срезаемого слоя режущим лезвием инструмента (стружка отрыва).

Исходя из этого, были выделены три вида стружек сдвига: ***элементная, суставчатая, сливная*** и одна – стружка отрыва, называемая ***стружкой надлома*** (рис. 3.9).

Элементная стружка (рис. 3.9 *а*) состоит из отдельных «элементов», приблизительно одинаковой формы, не связанных или слабо связанных друг с другом. Границу *nm*, отделяющую образовавшийся элемент стружки от срезаемого слоя, называют поверхностью сдвига (скалывания). Физически она представляет собой поверхность, по которой в процессе резания периодически происходит разрушение срезаемого слоя.

У ***суставчатой стружки*** (рис. 3.9 *б*) разделение ее на отдельные части не происходит. Поверхность сдвига (скалывания) только наметилась, но она не пронизывает стружку по всей толщине. Поэтому стружка состоит как бы из отдельных суставов без нарушения связи между ними.

Основным признаком ***сливной стружки*** (рис. 3.9 *в*) является ее сплошность (непрерывность). Если на пути движения сливной стружки

нет никаких препятствий, то она сходит непрерывной лентой, завиваясь в плоскую или винтовую спираль, пока часть стружки не отламывается под действием собственного веса. Такая стружка наиболее сложно удаляется из зоны обработки и является нежелательной, в отличие от элементной и суставчатой, особенно при обработке на станках-автоматах и с ЧПУ.

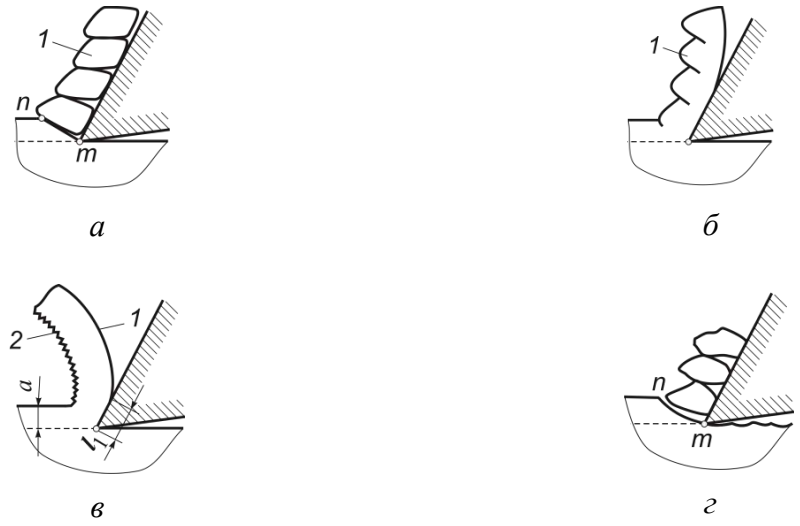


Рисунок 3.9 – Типы стружек при резании: *а* – элементная; *б* – суставчатая; *в* – сливная; *г* – надлома

Поверхность стружки *1* (см. рис. 3.9 *в*), прилегающую к передней поверхности инструмента, называют контактной стороной (поверхностью). Она сравнительно гладкая, а при высоких скоростях резания отполирована в результате трения о переднюю поверхность инструмента. Ее противоположную поверхность *2* называют свободной стороной (поверхностью) стружки. Она покрыта мелкими зазубринами (насечкой) и при высоких скоростях резания имеет бархатистый вид. Стружка соприкасается с передней поверхностью инструмента в пределах площадки контакта, длина которой обозначена через l_1, а ширина равна рабочей длине главной режущей кромки.

Стружка надлома (рис. 3.9 *г*) состоит из отдельных, не связанных друг с другом кусочков различной формы и размеров. Образованию стружки надлома сопутствует мелкая металлическая пыль. Поверхность разрушения *nm* может располагаться ниже поверхности резания, в результате чего последняя покрыта следами от выломанных из нее объемов стружки.

Лекция 3. Процесс образования сливной стружки при свободном прямоугольном резании. Определение степени деформации стружки

Исследования, проведенные с помощью метода делительной сетки (см. рис. 3.6), а также измерения микротвердости корней стружки (см. рис. 3.7) показали, что между срезаемым слоем и образовавшейся стружкой существует более или менее отчетливо выраженная переходная зона. Схема, поясняющая процесс образования сливной стружки, представлена на рис. 3.10.

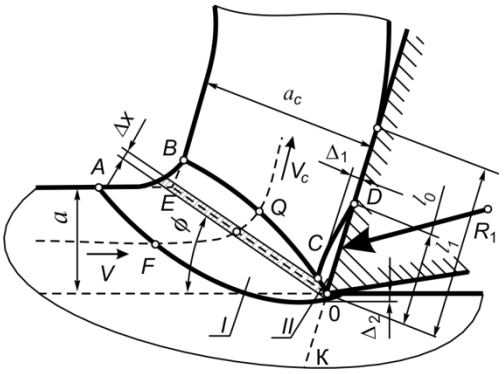


Рисунок 3.10 – Зоны первичной и вторичной деформаций при превращении срезаемого слоя в сливную стружку

Режущее лезвие инструмента через площадку контакта длиной l_1 действует на срезаемый слой толщиной a. Сосредоточенная сила R_1, с которой передняя поверхность инструмента давит на срезаемый слой, получила название ***силы стружкообразования***. Линией OK обозначена нейтральная граница сжимающих (слева) и растягивающих (справа) напряжений в обрабатываемом материале ниже поверхности резания. Частица обрабатываемого материала, двигаясь навстречу лезвию инструмента, испытывает сначала упругие, а затем пластические деформации сдвига. Та часть поля напряжений, в пределах которой происходят пластические деформации, является зоной стружкообразования.

Перед передней поверхностью инструмента расположена пластическая зона *I* первичной деформации $OABCO$. Эта зона имеет форму клина с вершиной на лезвии инструмента. Ее нижняя граница OA вогнута и пересекает продолжение поверхности резания. Верхняя граница OB зоны выпукла и ее длина в 2–4 раза меньше длины линии OA. Линия AB плавно сопрягает предыдущую поверхность резания со свободной стороной стружки. Элемент срезаемого слоя, перемещающийся относительно инструмента со скоростью резания V, начинает деформироваться в точке F и, проходя по траектории своего движения, получает все большую степень деформации. Деформация зерна заканчивается в точке Q, где оно приобретает скорость V_c, равную скорости стружки. Поэтому левее линии OA находятся еще пластически недеформированные зерна материала срезаемого слоя, а правее линии OB – зерна материала, принадлежащие стружке.

Многочисленные эксперименты показывают, что ширина стружки по сравнению с шириной срезаемого слоя даже при свободном резании увеличивается незначительно; при несвободном резании уширение стружки еще меньше. Поэтому можно считать, что деформированное состояние в зоне стружкообразования является плоским и срезаемый слой в процессе резания претерпевает деформацию сдвига.

Причину образования объемной зоны деформации установил Н. Н. Зорев, представив ее в виде веера линий постоянных касательных напряжений (рис. 3.11). В области промышленно применяемых передних углов, толщин срезаемого слоя, а особенно скоростей резания сдвиговые деформации локализуются в очень тонком слое толщиной Δx (см. рис. 3.10), а семейство поверхностей скольжения можно заменить единственной плоскостью OE, называемой ***условной плоскостью сдвига*,** наклоненной к направлению скорости резания под ***углом сдвига*** ϕ .

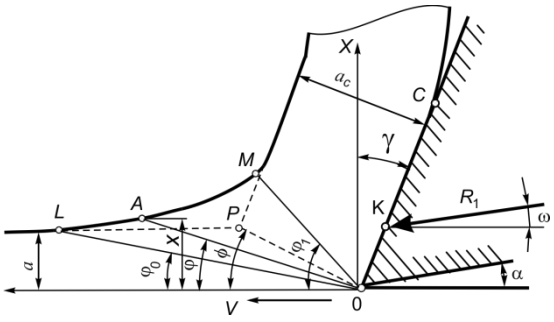
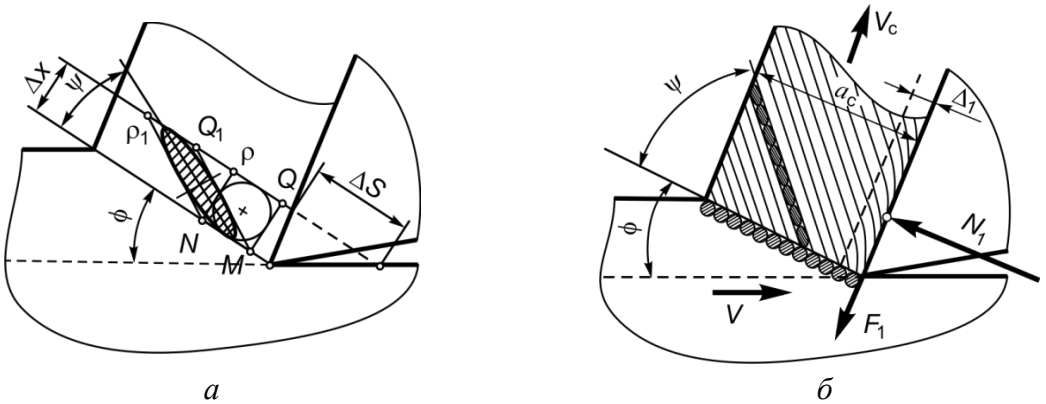


Рисунок 3.11 – Упрощенная схема стружкообразования по Н. Н. Зореву

В результате пластической деформации в стружке образуется текстура в виде полос или строчек, расположенных под некоторым углом к условной плоскости сдвига (рис. 3.12 *а*), называемым углом текстуры ψ. Линии текстуры представляют цепочки деформированных зерен стружки, получивших после прохождения через условную плоскость сдвига определенную форму и ориентацию.



а *б*

Рисунок 3.12 – Схема превращения сфероидального зерна в эллипсоидальное (*а*) и формирование текстуры (*б*)

Цепочки эллипсов в направлении их больших осей (рис. 3.12 *б*) представляют линии текстуры деформации стружки.

Превращение сфероидального зерна в эллипсоидальное является следствием первичной деформации срезаемого слоя при прохождении зерна через условную плоскость сдвига. Отношение $\Delta L/\Delta L_c = K_L$ (рис. 3.13) получило название ***коэффициента продольной усадки*** или укорочения стружки, а выражение

$$K_L = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin\phi}$$

называют формулой Тиме. Используя формулу Тиме, можно определить угол сдвига через коэффициент усадки стружки:

$$\mathrm{tg}\phi = \frac{\cos\gamma}{K_L - \sin\gamma}$$

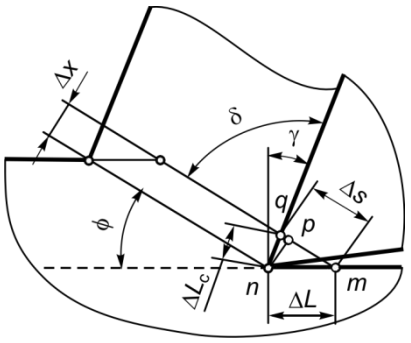


Рисунок 3.13 – Схема для определения относительного сдвига при резании

Пластическая деформация при резании металлов внешне проявляется в том, что толщина стружки a_c становится больше толщины срезаемого слоя a (рис. 3.14), а ее ширина больше ширины срезаемого слоя, т. е. $b_c > b$. Но так как объем стружки остается прежним, оказывается, что длина стружки L_c обычно короче пути L, пройденного инструментом. Указанное изменение размеров срезаемого слоя называется ***усадкой стружки*** и характеризуется коэффициентами:

$$K_L = \frac{L}{L_c}; \quad K_a = \frac{a_c}{a}; \quad K_b = \frac{b_c}{b},$$

где K_L, K_a, K_b – ***коэффициенты*** соответственно ***укорочения***, ***утолщения*** и ***уширения*** *стружки.* Эти коэффициенты, как правило, больше единицы и являются косвенными показателями интенсивности пластической деформации при резании металлов. Они показывают, во сколько раз размеры стружки по длине, толщине и ширине меньше или больше соответствующих размеров срезае-

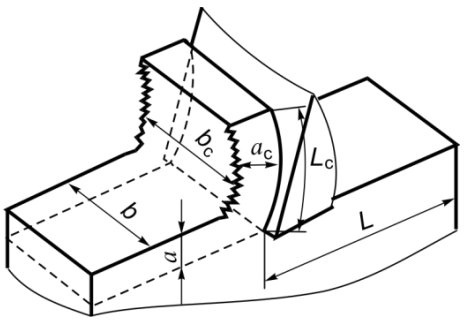


Рисунок 3.14 – Размеры срезаемого слоя и стружки

мого слоя. Так как объем стружки равен объему срезаемого слоя, ($Lab = L_c a_c b_c$), то $K_L = K_a K_b$.

Обычно уширение стружки даже при свободном резании невелико и составляет 5...15 % от ширины срезаемого слоя, в то время как укорочение и утолщение стружки оценивается в 250...600 % и более. Поэтому при черновой обработке уширением стружки можно пренебречь и считать, что $K_L = K_a$. При резании же с малыми сечениями срезаемого слоя K_b достаточно велик и достигает 1,5 и более. В этих случаях даже поперечное сечение стружки не соответствует сечению среза, а приобретает форму треугольника. Поэтому при исследовании чистовых процессов отдельно рассматривают K_L, K_a и K_b.

Коэффициент усадки определяется экспериментально двумя способами:

- измерением длины стружки, снятой с участка заготовки заданной длины;
- весовым способом.

Для реализации первого способа при точении длина срезаемого слоя на цилиндрической заготовке искусственно ограничивается с помощью продольных пазов с фиксированными расстояниями между ними (рис. 3.15). Для заготовки диаметром d и с пазом шириной $b_п$ длина пути резания составляет:

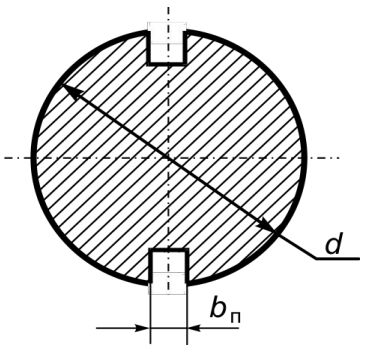


Рисунок 3.15 – Форма заготовки для определения коэффициента усадки

$$L = \frac{\pi d}{2} - b_п .$$

Измерив длину нескольких стружек (по внешней прирезцовой стороне) и определив среднее значение, можно получить выражение для расчета коэффициента усадки стружки по длине:

$$K_L = (0{,}5\pi d - b_п)/L_c .$$

Весовой метод используется тогда, когда трудно получить непрерывную стружку значительной длины, снятой со всего пути L. Из соотношения между коэффициентами усадки вытекает, что

$$K_L = \frac{L}{L_c} = \frac{a_c b_c}{ab} = \frac{f_c}{f},$$

где f_c и f – соответственно, площади поперечного сечения стружки и срезаемого слоя.

Площадь срезаемого слоя для элементов стружки произвольной формы длиной 10...30 мм определяется по ее весу и объему. Вес стружки рассчитывается по формуле

$$G[\text{г}] = \frac{a_c\,[\text{мм}]\,b_c\,[\text{мм}]\,L_c\,[\text{мм}]\,\rho[\text{г/см}^3]}{1000},$$

отсюда имеем площадь поперечного сечения стружки $f_c = 1000G/L_c\rho$ и зависимость для коэффициента усадки

$$K_L = \frac{1000G}{L_c \rho S t}.$$

Лекция 4. Схема образования элементной стружки

Исследованиями искажения делительной сетки в зоне стружкообразования при обработке малопластичных и хрупких материалов установлено, что прежде чем произойдет разрушение по плоскости скалывания *mn* (рис. 3.16), в объеме будущего элемента стружки возникают значительные деформации сжатия, вызывающие течение материала срезаемого слоя вдоль и перпендикулярно режущей кромке инструмента. С учетом этого превращение срезаемого слоя в элемент стружки происходит следующим образом (рис. 3.17). При перемещении инструмента на расстояние Δl его передняя поверхность деформирует объем материала, ограниченный параллелограммом M_0MNN_0. Когда напряжения сжатия превзойдут предел текучести деформируемого материала, начнется его перемещение по передней поверхности лезвия инструмента и точка M_0 совпадет не с точкой *K*, как это бывает при образовании сливной стружки, а с точкой *Q*. Одновременно сторона M_0N_0 параллелограмма укорачивается до *QP*. В результате элемент срезаемого слоя M_0MNN_0 превращается в элемент стружки *MNPQ*. Когда запас пластичности обрабатываемого мате-

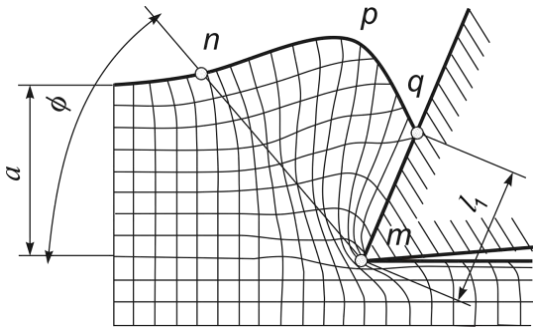


Рисунок 3.16 – Искажение делительной сетки в элементе стружки

риала будет исчерпан, начинается его разрушение по плоскости скалывания, и сколотый элемент перемещается вверх по передней поверхности лезвия инструмента. Чем больше степень деформации срезаемого слоя, тем больше форма элемента стружки в виде трапеции *MNPQ* приближается к треугольной. При этом сторона *MN* элемента стружки получает значительно большее уширение, чем при образовании сливной стружки.

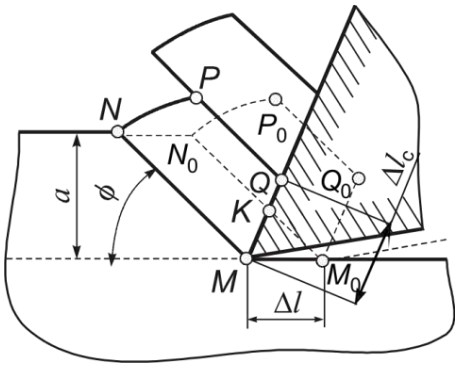


Рисунок 3.17 – Схема превращения срезаемого слоя в элемент стружки

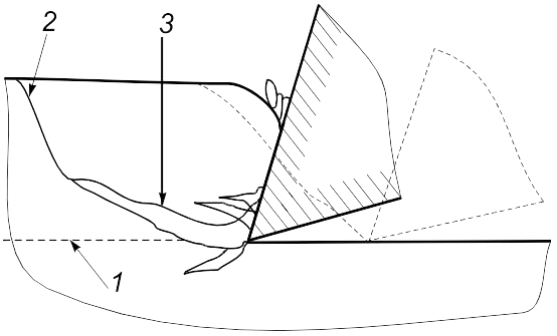


Рисунок 3.18 – Схема стружкообразования при резании хрупких материалов

Достижения в области механики сплошных сред позволили изучить процесс резания хрупких материалов с позиции теории разрушения или трещинообразования. Как установлено, при внедрении режущего лезвия в твердое тело у его вершины и обрабатываемом материале появляются микротрещины, распространяющиеся в направлении вектора скорости и переходящие в макротрещину критической длины (рис. 3.18).

На первом этапе стружкообразования происходит непрерывное повышение силы резания, обеспечивающее развитие ведущей трещины *3*. Оно продолжается до тех пор, пока на формирование стружки не начнет оказывать воздействие напряжение изгиба, приводящее к быстрому падению силы резания и отрыву элемента стружки по поверхности скалывания *2*.

На втором этапе происходит зачистка поверхности резания *1*, характеризующаяся отрывом более мелких частиц стружки по описанной схеме. Поэтому резание с образованием стружки надлома часто сопровождается выделением металлической пыли. Если развитие основной трещины идет ниже поверхности резания, то второй этап не наблюдается.

Микрофотографирование зоны стружкообразования позволило выявить образование трещин впереди резца при обработке хрупких мате-

риалов, тогда как при резании пластичных материалов их обнаружить не удалось.

Лекция 5. Трибология процесса резания материалов. Наростообразование

Процесс трения на рабочих поверхностях инструмента имеет как сходные черты, так и различия с процессом, возникающим при скольжении любых металлических поверхностей.

За исключением определенных плоскостей спайности кристаллов твердые поверхности имеют пространственные дефекты, которые превосходят по размерам атомные расстояния. При наложении одной поверхности на другую действительная площадь контакта A_r обычно составляет незначительную долю от идеальной (номинальной) площади A_a (рис. 3.19). Контактирование происходит по отдельным выступающим неровностям. При увеличении нагрузки на соединяющиеся поверхности площадь контакта увеличивается – первоначально за счет упругих деформаций. Однако уже при незначительном росте нагрузки деформация неровностей становится пластической, и площадь контакта A_r увеличивается прямо пропорционально прилагаемой нагрузке N, независимо от реальной или идеальной площади поверхностей.

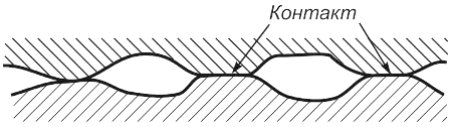


Рисунок 3.19 – Схема контактирования двух шероховатых поверхностей

Сила трения в этом случае является силой, необходимой для разделения или пластического деформирования площадок фактического контакта на вершинах выступов. Она также увеличивается прямо пропорционально нормальной силе. Их отношение есть величина примерно постоянная и называется коэффициентом трения. Таким образом, представления о скольжении, ***внешнем трении*** и коэффициенте трения применимы для решения многих практических задач, в которых напряжения на поверхностях малы по сравнению с пределом текучести материалов.

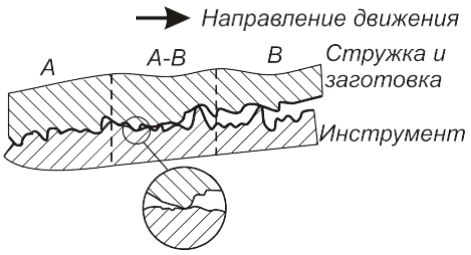


Рисунок 3.20 – Условия трения на различных участках контакта между стружкой и передней поверхностью инструмента

Многочисленными исследованиями контактной зоны при резании установлено, что на различных ее участках имеются

условия для внешнего трения (участок *B*, рис. 3.20), сваривания и внутреннего сдвига (участок *A*, рис. 3.20) и переходного участка *A–B*, где эти условия существуют одновременно. При этих условиях перемещение материала заготовки по поверхности резца не может быть адекватно описано с применением терминов «скольжение» и «трение» в их обычном понимании. Традиционное понятие коэффициента трения непригодно для рассмотрения взаимосвязи между силами, возникающими в процессе резания, по двум причинам: во-первых, нет простой зависимости между силами, нормальными и параллельными поверхности инструмента, и, во-вторых, сила, параллельная контактной поверхности инструмента, зависит от площади контакта, являющейся очень важным параметром процесса резания металла. Условия, при которых происходит сцепление или соединение двух поверхностей, рассматриваются здесь как условия схватывания в отличие от условий скольжения на поверхности раздела.

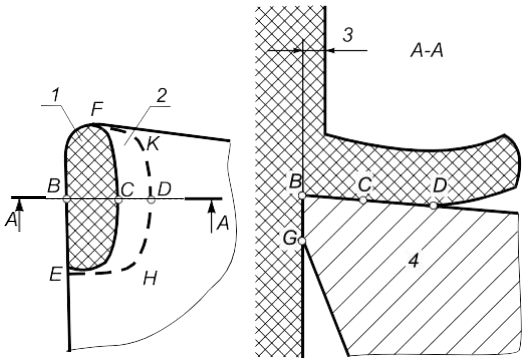


Рисунок 3.21 – Схема контакта между стружкой и передней поверхностью

Для упрощения принято считать, что поверхность трения на передней поверхности длиной l_1 состоит из двух участков: участка *1 – BECF* пластического контакта (рис. 3.21) длиной l_0 и участка *2 – EHDKFC* упругого контакта, где, судя по визуальным наблюдениям, контакт прерывистый. На участке *1* расположен заторможенный слой, в пределах которого стружка движется не по передней поверхности, а по заторможенному (приваренному) слою, и сопротивление, оказываемое движению стружки, определяется сопротивлением сдвигу в контактном слое стружки с учетом температуры этих слоев. На этом участке внешнее трение скольжения отсутствует и заменяется более энергетически выгодным – «внутренним» трением между отдельными слоями стружки. На участке *2* стружка контактирует в условиях внешнего трения скольжения и сопротивление движению стружки определяются силой трения между стружкой и передней поверхностью инструмента.

Интенсивность адгезионного схватывания инструментального материала с обрабатываемым во многом определяется склонностью первого к образованию на нем под действием кислорода воздуха окисных пленок, препятствующих схватыванию. Для инструментальных материалов, склонных к образованию более прочных окисных пленок, коэффициент

адгезионного трения и средний коэффициент трения меньше. В связи с этим средний коэффициент трения для однокарбидных сплавов больше, чем для двухкарбидных, а для быстрорежущей стали больше, чем для однокарбидных сплавов. С увеличением в твердом сплаве содержания карбидов титана средний коэффициент трения уменьшается. Наименьший коэффициент трения для КНБ и алмаза.

Если резание производится с СОТС, создающей граничный смазочный слой, препятствующий образованию интерметаллических соединений, а заторможенный слой на передней поверхности отсутствует, то вся площадка контакта определяется упругим взаимодействием стружки с передней поверхностью. В этом случае трение между стружкой и передней поверхностью является внешним.

Если образовавшийся заторможенный слой охватывает всю ширину площадки контакта, то внешнего трения нет, и средний коэффициент трения будет характеризовать процессы пластической деформации, происходящие в контактном слое стружки.

Несмотря на очень большое давление, оказываемое стружкой на переднюю поверхность, окружающая среда и смазочно-охлаждающая жидкость могут проникать на большую часть площадки контакта. Объясняется это рядом обстоятельств. Передняя поверхность инструмента после заточки и поверхность стружки покрыты неровностями, в результате чего между ними нет сплошного контакта. Свежеобразованная химически чистая контактная поверхность стружки обладает исключительно высокой поверхностной и химической активностью, что способствует мгновенному проникновению под стружку смазочно-охлаждающей жидкости или окружающей среды.

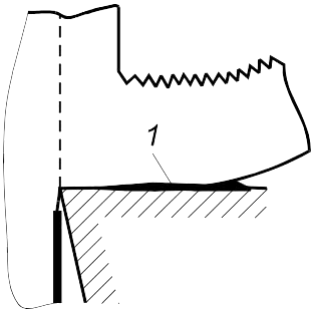


Рисунок 3.22 – Граничный смазочный слой на части площади контакта передней поверхности

В результате этого на части площадки контакта образуется граничный слой смазки (рис. 3.22) или пленки окислов, нитридов, гидридов и т. п. и устанавливается режим полусухого трения. Граничный смазочный слой *1* полностью или частично устраняет действие сил адгезии, и сопротивление движению стружки по передней поверхности определяется не механическими свойствами обрабатываемого материала, а свойствами смазочно-охлаждающей технологической среды или образовавшегося химического соединения.

При высоких температурах и давлениях в зоне резания химически чистые (ювенильные) поверхности стружки и инструмента подвергаются адгезионному схватыванию – происходит прочное присоединение части контактного слоя стружки к передней поверхности инструмента и образование заторможенного слоя. В некоторых случаях обтекание этого слоя стружкой способствует возникновению новых заторможенных слоев металла, которые наращиваются друг на друга, пока этот заторможенный слой, называемый ***наростом***, не достигнет максимально возможных размеров при данных условиях (рис. 3.23). Шероховатая поверхность каждого вновь образующегося заторможенного слоя создает благоприятные условия для проникновения кислорода воздуха и его диффундирования в поверхностные слои металла. Оксидные пленки уменьшают трение между стружкой и поверхностью нароста, поэтому каждый последующий заторможенный слой становится короче предыдущего, что придает наросту клиновидную форму.

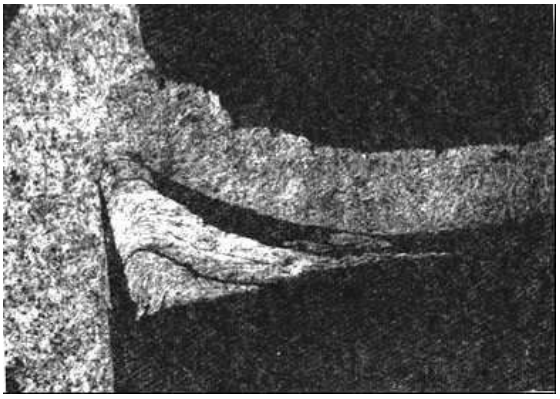


Рисунок 3.23 – Микрофотография корня стружки с наростом

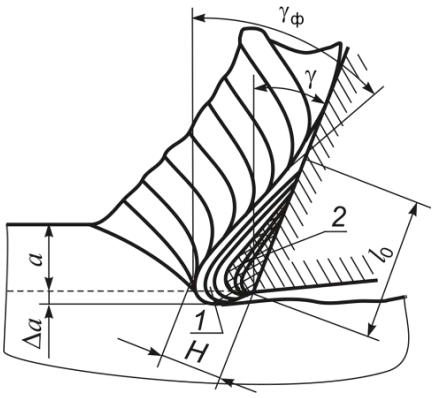


Рисунок 3.24 – Схема строения и размеры нароста

Под наростом понимают клиновидную, относительно неподвижную область обрабатываемого материала, расположенную на передней поверхности лезвия у его режущей кромки. Нарост – сложное по химическому составу агрегатное состояние материала из продуктов взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов и окружающей среды. Он состоит из слоев сильно деформированного обрабатываемого материала с включениями оксидов и карбидов обрабатываемого и инструментального материалов, а также кобальта, например, в случае твердого сплава.

Строение нароста сложное (рис. 3.23, 3.24): основная его часть *2* – это «третье тело», прочно соединенное с поверхностью инструмента, на

которое наращиваются последующие слои сходящей стружки; остальные части нароста – *1*, расположенные на основной, имеют иное происхождение и являются частью застойной зоны.

Изучение влияния нароста и застойной зоны на процесс резания имеет большое практическое значение, так как многие специфические явления, наблюдаемые при работе сложного многолезвийного инструмента (протяжек, разверток, метчиков и т. д.), невозможно понять без учета влияния нароста и застойной зоны.

Например, при протягивании можно обеспечить устойчивый процесс стружкообразования при очень малых толщинах срезаемого слоя, порядка 0,005 мм, независимо от радиуса округления режущей кромки, если образуется нарост, который закрывает собой округленную часть кромки. При использовании активных СОТС нарост исчезает и стабильная работа при таких тонких срезаемых слоях становится невозможной.

Вторым примером является возможность применения разверток с кольцевой заточкой задней поверхности, которые не имеют заднего угла. Подобные развертки успешно работают только при таких условиях резания, когда образуется нарост или застойная зона, выступающая над задней поверхностью.

Третьим примером является резкое падение, из-за уменьшения нароста при значительных углах схода стружки, стойкости винтовых цилиндрических фрез при переходе от умеренных углов наклона режущей кромки ($\omega \leq 45°$) к очень большим ($\omega = 70°$).

С помощью скоростной киносъемки установлено, что в большинстве случаев нарост – образование нестабильное. При достижении определенной высоты его прочность оказывается недостаточной и он разрушается (рис. 3.25), причем частота срывов может достигать 3000…4000 раз в минуту (при V = 40…60 м/мин). Разрушению нароста способствует и то, что он не полностью охватывается стружкой, т. е. между наростом, стружкой и поверхностью резания появляются зазоры, в результате чего он перестает

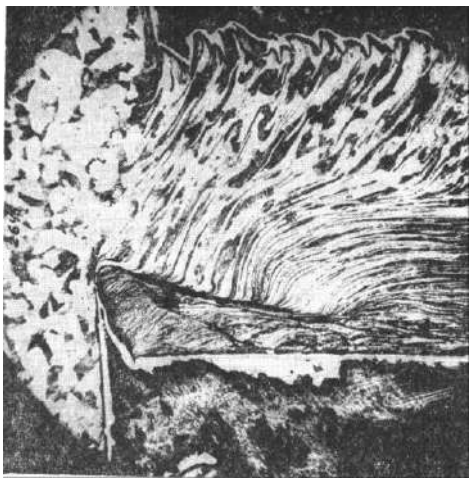


Рисунок 3.25 – Микрофотография (×120), показывающая срыв верхней части нароста (сталь 30Х, V = 0,067 м/с, a = 0,149 мм)

находиться в условиях равновесного всестороннего сжатия. Разрушенный нарост частично уносится стружкой, частично поверхностью резания.

Вследствие высокой твердости нароста он, выполняя функции режущего лезвия, отчасти предохраняет переднюю и заднюю поверхности инструмента от истирания их сходящей стружкой и обработанной поверхностью и уменьшает нагревание. Это приводит к уменьшению изнашивания инструмента, т. е. к повышению периода его стойкости.

Все обрабатываемые материалы можно разделить на ***склонные к наростообразованию*** и ***не склонные к нему***. К первым относятся медь, латунь, бронза, олово, свинец, большинство титановых сплавов, белый чугун, закаленные стали, легированные стали с большим содержанием хрома и никеля; ко вторым – конструкционные, углеродистые и большинство легированных сталей, серый чугун, алюминий, силумин.

Экспериментально установлено, что при наиболее распространенных условиях резания сталей нарост имеет максимальную высоту при таком значении скорости резания, при котором температура $\theta \approx 300°C$, и исчезает при значении скорости, при которой температура $\theta \approx 600°C$. Уменьшение размеров нароста при температурах более 300°С объясняется значительным снижением сопротивления материала нароста пластическому сдвигу вследствие его размягчения. По мере увеличения скорости резания (температуры на передней поверхности) изменяются не только размеры нароста, но и его форма (рис. 3.26).

При относительно низких скоростях резания и температурах образуется нарост первого вида (см. рис. 3.26, зона *I*). Он имеет форму, близкую к треугольной, мало развит по высоте, имеет небольшой радиус округления вершины. Задний угол нароста близок к нулю, поэтому он практически не выступает за заднюю поверхность инструмента. Передний угол нароста невелик. Как следствие, сходящая стружка контактирует с передней поверхностью инструмента за наростом. Структура нароста представляет собой слои, почти параллельные передней поверхности (с замыканием концов этих слоев на передней поверхности).

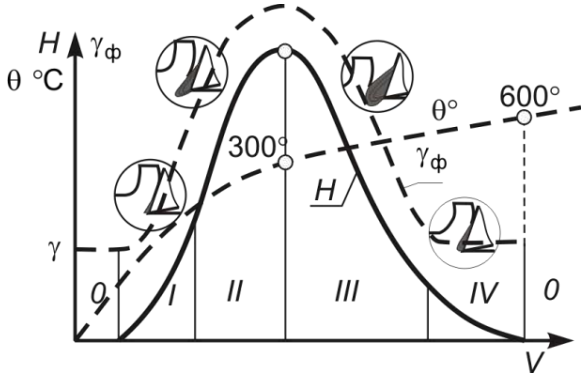


Рисунок 3.26 – Зависимость высоты нароста от скорости резания:
0 – нарост отсутствует; *I...IV* – образуется нарост различных видов

При более высоких скоростях (см. рис. 3.26, зона *II*) образуется нарост второго вида, значительной высоты, с большим передним углом и задним углом, достигающим 5 ... 12°. Стружка постоянно контактирует с передней поверхностью нароста, примыкающей к его вершине, а с остальной частью контакт прерывистый. Основание нароста, примыкающее к передней поверхности, достаточно стабильно, а его верхняя часть часто разрушается и уносится стружкой или поверхностью резания.

С дальнейшим возрастанием скорости резания и температуры клиновидное тело преобразуется в нарост третьего вида (см. рис. 3.26, зона *III*). Его форма становится прямоугольной или близкой к трапецеидальной, имеет значительную высоту. Действительный передний угол режущего клина чаще всего небольшой, иногда меньше нуля ($\gamma_ф$ = –5...15°). Нарост значительно выступает за заднюю поверхность и защищает ее от непосредственного контакта с поверхностью резания, фактически трансформируясь в инструмент с укороченной передней поверхностью. Над вершиной нароста развивается застойная зона, а на стружке заметна вторичная деформация. Наросты такого вида наиболее стабильны, их срыв происходит крупными частицами или полностью.

Наконец, при еще более высоких скоростях и температурах резания возникает нарост четвертого вида (см. рис. 3.26, зона *IV*), по форме и расположению близкий к первому. За счет малой высоты и большого действительного переднего угла сходящая стружка на некотором расстоянии от режущей кромки входит в плотный контакт с передней поверхностью. Текстура такого нароста выражена слабо. Это – нестабильное образование, постоянно изменяющееся во всем объеме. Разрушение его происходит не за счет срыва, а путем постоянного «стекания» с лезвия. При этом нарост размазывается по поверхности резания и прирезцовой стороне стружки.

Левее первой зоны и правее четвертой нарост практически не образуется, хотя заторможенный слой существует.

В зоне скоростей резания, соответствующих максимальной высоте нароста, наблюдается резкое увеличение шероховатости обработанной поверхности. При периодическом разрушении вершины нароста, связанной со срезаемым слоем, на поверхности резания и обработанной поверхности образуются надрывы и борозды, а часть нароста внедряется в обработанную поверхность. Все это увеличивает шероховатость обработанной

поверхности, и, таким образом, зона *II* скоростей и температур резания (см. рис. 3.26) наименее благоприятна для чистовой обработки.

При росте нароста, его разрушении и последующем возрастании происходит периодическое изменение фактического переднего угла инструмента и, как следствие, периодические изменения силы резания. Поэтому при максимально развитом наросте могут возникнуть вынужденные колебания системы станок–инструмент–приспособление–заготовка (СПИЗ) с частотой, равной частоте образования и полного или частичного разрушения нароста.

Все перечисленные обстоятельства делают крайне нежелательным возникновение нароста при чистовой обработке. Поэтому при обработке материалов, склонных к наростообразованию, для устранения отмеченных нежелательных явлений необходимо работать в такой зоне скоростей, где нарост не образуется.

Тема 4
СИЛА И МОЩНОСТЬ ПРИ РЕЗАНИИ

Лекция 1. Система сил при резании

Рассмотрим процесс врезания режущего лезвия в обрабатываемый материал в условиях прямоугольного свободного резания, когда плоскость стружкообразования P_c совпадает с главной секущей плоскостью P_τ. Плоскостью стружкообразования (ее иногда называют плоскостью деформации) P_c называют плоскость, проведенную в рассматриваемой точке режущей кромки инструмента через векторы скоростей резания $\overline{V}$ (вход в зону деформации) и схода стружки $\overline{W}$ (выход из зоны деформации). На передней поверхности в каждой точке ее контакта со стружкой действуют элементарные нормальные напряжения σ_N и касательные к ней удельные силы трения q_{F1} (рис. 4.1). Их можно свести к одной равнодействующей R_1, являющейся суммой силы N_1 – нормальной к передней поверхности, и силы трения F_1, которые называют ***физическими составляющими силы резания на передней поверхности*** (рис. 4.2).

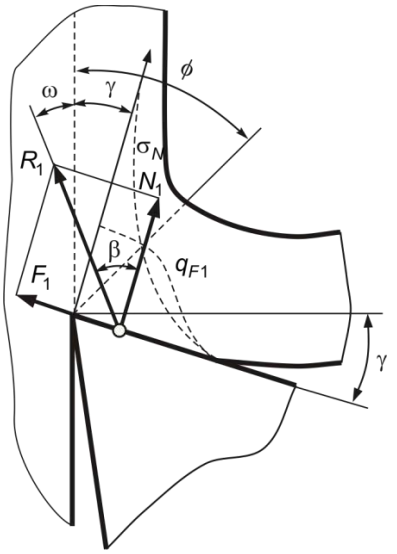


Рисунок 4.1 – Схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

Сила R_1 наклонена под углом действия ω относительно вектора скорости резания V и уравновешивается сопротивлением обрабатываемого материала движению резания. Оно выражается силой R_1', являющейся геометрической суммой напряжений, возникающих в зоне стружкообразования (плоскости сдвига).

Сила R_1' состоит из двух составляющих – силы сдвига R_τ, действующей в плоскости сдвига АВ, и нормальной к ней силы сжатия R_n.

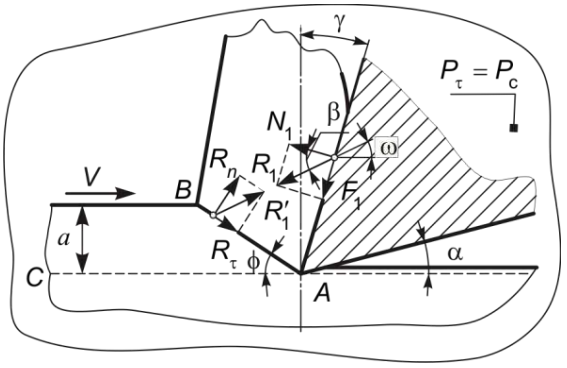


Рисунок 4.2 – Силы резания, возникающие на передней поверхности и в плоскости сдвига

Необходимо отметить, что важнейшее отличие процесса реза-

ния от всех других методов обработки материалов давлением (ОМД) состоит в том, что при ОМД деформация является результатом приложения силы, а при резании – наоборот, сила определяется деформацией срезаемого слоя. Это явление связано с тем, что при резании срезаемый слой имеет свободные поверхности, деформация которых определяется условиями (режимами) резания и геометрией инструмента. Поэтому изменение условий резания приводит к изменению величины силы.

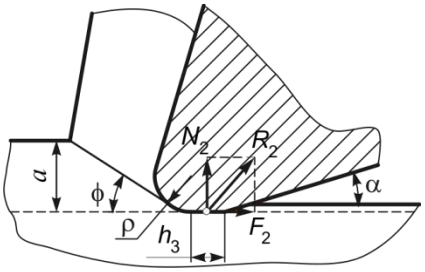


Рисунок 4.3 – Силы резания, возникающие на задней поверхности инструмента

Предварительная упругая и пластическая деформации сжатия под действием силы стружкообразования R_1 распространяется на область, лежащую частично ниже линии среза АС (см. рис. 4.2). При прохождении режущего лезвия деформированный приповерхностный слой начинает упруго восстанавливаться, воздействуя на заднюю поверхность лезвия (рис. 4.3). Силы на этой поверхности возникают даже при резании остро заточенным инструментом. При наличии же значительного радиуса округления кромки ρ они увеличиваются, т. к. часть слоя, подлежащего снятию, не срезается, а вдавливается.

Таким образом, в результате упругопластического контактирования поверхности резания и задней поверхности на последней возникает нормальная сила N_2 и сила трения F_2. Эти силы называются ***физическими составляющими на задней поверхности***. Зависимость сил N_2 и F_2 от толщины срезаемого слоя a незначительна. Сила R_2 является суммарной силой, действующей на заднюю поверхность лезвия.

Геометрическую сумму силы $\bar{R}_1$ действующей на передней поверхности, и $\bar{R}_2$ – на задней, называют силой резания $\bar{R}$ т. е.

$$\bar{R} = \bar{R}_1 + \bar{R}_2 = \overline{N_1} + \overline{N_2} + \overline{F_1} + \overline{F_2}.$$

В общем случае величина силы $\bar{R}$ и ее положение в пространстве определяется величиной и соотношением нормальных сил и сил трения, зависящих от геометрических параметров инструмента и условий резания, т. е. ее положение заранее неизвестно. Из-за этого непосредственное измерение этой силы при помощи приборов невозможно. Поэтому принято определять не саму силу резания $\bar{R}$, а ее ***технологические составляю-***

щие P_z, P_y и P_x, являющиеся проекциями силы R на заранее определенные направления (координатные оси z, y и x).

Эти координатные оси назначаются следующим образом: ось z, определяющая направление наибольшей (главной или касательной) составляющей силы P_z, совпадает с вектором скорости главного движения $\overline{V}$ ось x совпадает с направлением вектора скорости подачи $\overline{V}_S$ и определяет направление силы сопротивления подаче P_x, направление силы P_y перпендикулярно рабочей плоскости P_s или обработанной поверхности. Тогда при изменении геометрических параметров инструмента и режима резания изменяются только величины сил P_z, P_y и P_x, а их положение в пространстве будет оставаться неизменным и определяться направлениями скоростей резания и подачи. Зная величины составляющих P_z, P_y и P_x, легко определить величину самой силы резания (рис. 4.4):

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2} \ .$$

Для определения технологических составляющих P_z, P_y и P_x, силы резания $\overline{R}$ используют три группы методов:

1) определение сил с помощью теоретических расчетов;

2) экспериментальные измерения динамометрами;

3) определение сил с помощью эмпирических зависимостей (по справочникам).

Связь между изменяемыми условиями резания и составляющими силы резания P_z, P_y и P_x, обычно находят экспериментально.

Приборы, предназначенные для измерения составляющих силы резания, называют динамометрами. Если динамометр измеряет одну составляющую, то он называется однокомпонентным, две – двухкомпонентным и три – трехкомпонентным.

К динамометрам предъявляют следующие основные требования.

1. Точность измерения. При измерениях сил, необходимых для определения мощности, расходуемой на резание, расчетов на прочность и жесткость инстру-

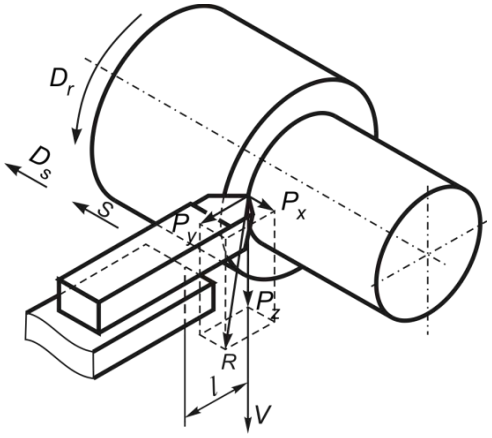


Рисунок 4.4 – Схема разложения равнодействующей силы R на составляющие P_z, P_y, P_x,

ментов и деталей станков, погрешность измерения не должна превышать 2–3%. Для исследования физических процессов резания точность измерений должна составлять 1–1,5 %, а в некоторых случаях доходить до 0,5 %.

2. Малая инерционность. Для этого частота собственных колебаний динамометра должна значительно превосходить частоту колебаний измеряемой системы.

3. Вибростойкость при любых скоростях резания. Для этого упругие звенья динамометров, воспринимающие действие сил, должны обладать максимально возможной жесткостью.

4. Отсутствие взаимного влияния составляющих силы резания, т. е. датчик динамометра, воспринимающий действие одной из составляющих силы резания, не должен реагировать на действие других составляющих.

По принципу действия различают динамометры: гидравлические, упруго-механические и упруго-электрические. Как правило, во всех конструкциях динамометров есть упругое звено, деформация которого регистрируется механическими или электрическими датчиками.

В настоящее время наиболее предпочтительными являются упруго-электрические динамометры. Их действие основано на преобразовании перемещения или деформации упругих звеньев динамометра в электрический сигнал с помощью электрических датчиков. Наибольшее распространение нашли параметрические электрические датчики (тензодатчики). Они компактны и позволяют в качестве показывающих и записывающих устройств применять универсальные гальванометры, магнито-электрические и электронные осциллографы, компьютеры.

В лучших зарубежных динамометрах используют пьезоэлектрические датчики, позволяющие наиболее точно измерять не только статическую величину силы резания, но и высокочастотную динамику ее изменения.

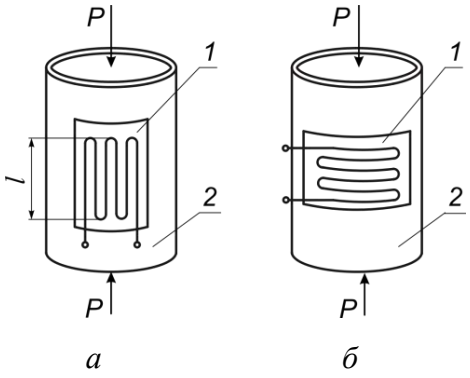


Рисунок 4.5 – Схема наклейки проволочного датчика *1* на упругий элемент *2*:
а – рабочий датчик;
б – компенсационный датчик

Проволочные тензодатчики наклеивают на упругое звено динамометра (рис. 4.5) и при его нагружении датчик претерпевает те же деформации, что и поверхность, на которой он расположен.

Растяжение или сжатие петель проволоки изменяет электрическое сопротивление датчика; это изменение пропорционально величине действующей силы.

Как правило, рабочий датчик R_1 включается в мостовую измерительную схему (рис. 4.6). Кроме этого вводится расположенный рядом с рабочим аналогичный, но недеформируемый при работе компенсационный датчик R_2 (рис. 4.5 *б*) для уравновешивания моста и для компенсации влияния температуры на сопротивление проволоки датчика R_1. R_3, R_4, R_5 и R_6 постоянные и переменные сопротивления, служащие для построения измерительного моста и его балансировки перед экспериментом.

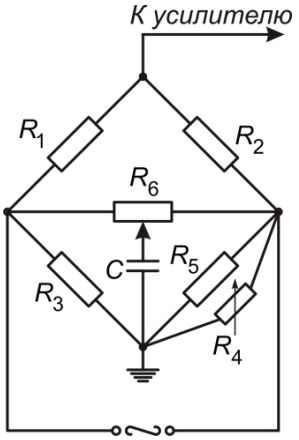


Рисунок 4.6 – Схема включения проволочного датчика в измерительную схему

Среди динамометров с проволочными датчиками наибольшее распространение нашли универсальные динамометры типа УДМ. Они позволяют измерять три составляющие силы резания при точении, нарезании резьбы резцом и метчиком, фрезеровании и шлифовании, осевую силу и крутящий момент при сверлении, развертывании, зенкеровании и нарезании резьбы метчиком. В зависимости от максимальной величины измеряемой главной составляющей силы резания P_z выпускают динамометры различной чувствительности: на 1000, 6000 и 12000 Н. Принципиальная схема динамометра изображена на рис. 4.7.

Основным элементом динамометра является квадратная пластина (лодочка), установленная в корпусе динамометра на упругих опорах *1–16* из термически обработанной стали. Опоры имеют трубчатую форму и обладают высокой жесткостью вдоль своей оси и малой – в направлении, перпендикулярном к оси. Для устранения зазоров и контактных деформаций в стыках деталей динамометра опоры имеют предварительный натяг, который несколько превышает половину максимальной нагрузки, допускаемой опорой. На опоры строго вдоль оси наклеены проволочные датчики с базой $l = 10$ мм (см. рис. 4.5 *а*).

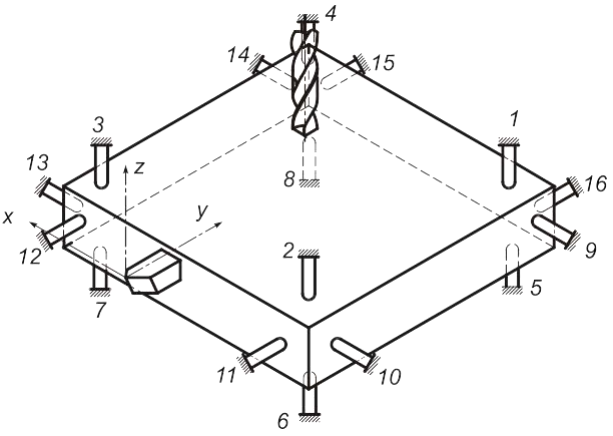


Рисунок 4.7 – Схема универсального динамометра типа УДМ

Расположение упругих опор и схема наклейки датчиков почти полностью устраняют влияние каждой силы на датчики, восприни-

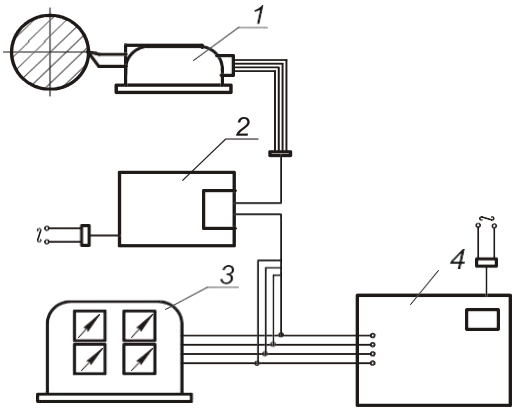


Рисунок 4.8 – Схема включения динамометра УДМ и измерительной аппаратуры в сеть

мающие действие других сил. Для усиления электрического сигнала на выходе измерительной схемы между динамометром *1* (рис. 4.8) и приборным щитом *3* с гальванометрами или осциллографом *4* предусмотрен электронный усилитель *2*.

Благодаря усилителю динамометры имеют большую жесткость упругих звеньев, что повышает их общую жесткость и виброустойчивость, и сокращает габариты.

Развитие информационных технологий и вычислительной техники позволяет записывать мгновенные значения сил в цифровом виде (с помощью аналогово-цифрового преобразователя – АЦП) с их последующей обработкой после окончания записи на персональном компьютере (ПК). Оцифрованные сигналы, предварительно пройдя через фильтр (ФНЧ), записываются в файл и после этого обрабатываются с возможностью дальнейшей распечатки результатов.

Данные измерений сил резания, как правило, аппроксимируют эмпирическими зависимостями, используемыми в дальнейшем для расчета или прогнозирования сил для любых условий резания. Эти зависимости, отражающие взаимосвязь изучаемых величин в процессе резания, в настоящее время принято выражать степенными функциями.

Нахождение степенных функций, выражающих силовые зависимости, очень облегчается при применении двойной логарифмической системы координат, где по осям абсцисс и ординат откладываются не сами величины, а их логарифмы. Действительно, пусть дана степенная функция $y = nx^m$. Тогда: $\lg y = \lg n + m \lg x$, то есть в двойной логарифмической системе координат степенная функция выражается прямой линией (рис. 4.9), причем m будет величиной, равной тангенсу угла ξ, образованного прямой с положительным направлением оси абсцисс, а n – отрезок на оси ординат, соответствующий значению $x = 1$.

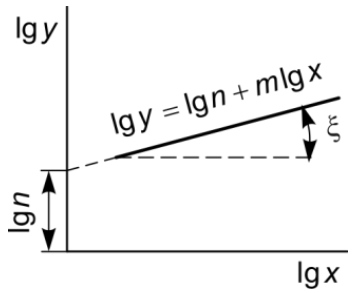


Рисунок 4.9 – Представление степенной функции в двойной логарифмической системе координат

Предположим теперь, что мы хотим представить функцию $P_z = f(a)$ в виде:

$$P_z = C_{pz} a^{y_{Pz}}.$$

Для этого результаты, полученные при экспериментах, следует изобразить графически, откладывая по оси абсцисс величины lg$a$, а по оси ординат – величины lgP_z. Соединяя точки прямой линией, определяют тангенс угла (***тангенс определяется не через угол в градусах, а как отношение двух катетов***), образованного ею с положительным направлением оси абсцисс, что дает величину y_{P_z}; отрезок, который прямая отсекла на ординате, соответствующей значению $a = 1$, дает величину C_{P_z}

Зависимость некоторой величины от двух и более факторов в виде степенной функции можно выразить только в том случае, когда степень влияния каждого из факторов не зависит от абсолютной величины самого этого фактора и абсолютной величины других факторов, т. е., когда между факторами нет взаимодействия.

В этом случае поступают так. Допустим, что требуется определить зависимость P_z от толщины срезаемого слоя a и ширины b в виде:

$$P_z = C_{pz} a^{y_{Pz}} b^{x_{Pz}}.$$

Для этого, используя степенную аппроксимацию, определяют зависимости $P_z = C'_{pz} a^{y_{Pz}}$ – при некотором значении $b = b_1$ и $P_z = C''_{pz} b^{x_{Pz}}$ при некотором значении $a = a_1$. Для того, чтобы общая зависимость была эквивалентной частным, должно быть:

$$P_z = C_{pz} a^{y_{Pz}} (b_1)^{x_{Pz}} = C'_{pz} a^{y_{Pz}} \text{ и } P_z = C_{pz} (a_1)^{y_{Pz}} b^{x_{Pz}} = C''_{pz} b^{x_{Pz}},$$

откуда определяют постоянную C_{P_z} из каждой степенной формулы, как:

$$C^{I}_{pz} = \frac{C'_{pz}}{(b_1)^{x_{Pz}}} \text{ и } C^{II}_{pz} = \frac{C''_{pz}}{(a_1)^{y_{Pz}}}.$$

Вследствие неизбежных погрешностей экспериментов величины C^{I}_{pz} и C^{II}_{pz} полученные из первой и второй серий, будут отличаться друг от

друга. Поэтому окончательное значение постоянной в формуле принимается как среднее арифметическое двух полученных значений:

$$C_{p_z} = \frac{C_{p_z}^{I} + C_{p_z}^{II}}{2}.$$

Недостатком изложенного графического метода является субъективность в проведении аппроксимирующей прямой, наиболее соответствующей нанесенным на график опытным точкам. Этот недостаток устраняется при применении аналитической аппроксимации, основанной на методе наименьших квадратов.

Следует особо отметить, что, несмотря на широкое распространение в теории резания степенных зависимостей, всякий раз к их употреблению надо подходить с большой осторожностью, так как они могут применяться только в том диапазоне изменения факторов, где они были получены, и по существу своему они не могут отразить всеобщей связи и взаимозависимости явлений.

Лекция 2. Закономерности влияния условий резания на его силу и мощность

Поскольку для острого инструмента величина участка контакта по передней поверхности намного больше, чем по задней, то основной вклад в величину общей силы резания вносят силы, действующие на передней поверхности.

Влияние глубины резания и подачи. При увеличении t и S (или b и a) пропорционально возрастает площадь поперечного сечения срезаемого слоя, а, значит, и нагрузка на переднюю поверхность, однако влияние этих факторов на коэффициент усадки разный. Изменение t (или b) практически не влияет на коэффициент усадки, потому что в зону резания вводятся лишь новые участки режущей кромки с аналогичными условиями резания (рис. 4.10 *б*). Следовательно, во столько же раз увеличивается нагрузка на резец, вызываемая силами, действующими на переднюю и заднюю поверхности инструмента.

Увеличение же S или толщины срезаемого слоя a (рис. 4.10 *в*) при такой же ширине b приводит к уменьшению степени пластической деформации. Одновременно силы на задней поверхности остаются неиз-