



Олег Никуленков
Игорь Швецов

Математические модели разрушения при механообработке

 **LAP**
LAMBERT
Academic Publishing

Математические модели разрушения при механообработке

LAP Lambert Academic Publishing (2019-06-18)

€ 35,90

Buy at the MoreBooks! Shop

Целью данных исследований является вопрос о возникновении в зоне обработки резанием высоких температур в результате внутреннего или внешнего трения, способствующих выгоранию примесных элементов из снимаемой стружки и образование летучих соединений при контакте обрабатываемого материала с атмосферным воздухом. Исходя из оценки физико-механических свойств и химической структуры составляющих системы ЗИССо (заготовка - инструмент - стружка - среда охлаждения): – во-первых, рассматриваются процессы образования газовых соединений с точки зрения взаимодействия элементов системы ЗИССо; – во-вторых, формируются общие требования, которым должны удовлетворять новые методики экспериментального определения концентрации образованных газообразных соединений в зоне обработки изделий на механических операциях; – в-третьих, намечаются пути дальнейшего совершенствования методики исследования диффузионных процессов и анализа газообразования, дается ряд практических рекомендаций.

Book Details:

ISBN-13:	978-620-0-21448-5
ISBN-10:	6200214484
EAN:	9786200214485
Book language:	Russian
By (author) :	Олег Никуленков Игорь Швецов
Number of pages:	84
Published on:	2019-06-18
Category:	Monographies

РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛА НА ПРИМЕРЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Основные положения данного раздела работы посвящены исследованиям изменения состояния обрабатываемого материала, в результате чего происходит его термомеханическое разрушение, сопровождающееся диффузией и лавинообразным массопереносом примесей к поверхности раздела фаз, затем - образованием летучих соединений и формированием газовой среды в зоне обработки при взаимодействии между собой элементов системы ЗИССо.

Стержневым разделом данной главы является впервые рассматриваемый в резании металлов вопрос о выгорании примесей из сталей и чугунов, их миграции к поверхности раздела фаз и образовании химических газообразных соединений в зоне обработки, а также тонких пленок на границе раздела гетерогенных фаз и разработка математических моделей.

Целью данных исследований является вопрос о возникновении в зоне обработки резанием высоких температур в результате внутреннего или внешнего трения, способствующих выгоранию примесных элементов из снимаемой стружки и образованию летучих соединений при контакте обрабатываемого материала с атмосферным воздухом. Исходя из оценки физико-механических свойств и химической структуры составляющих системы ЗИССо (заготовка - инструмент - стружка - среда охлаждения):

- во-первых, рассматриваются процессы образования газовых соединений с точки зрения взаимодействия элементов системы ЗИССо;

- во-вторых, формируются общие требования, которым должны удовлетворять новые методики экспериментального определения концентрации образованных газообразных соединений в зоне обработки изделий на механических операциях;

– в-третьих, намечаются пути дальнейшего совершенствования методики исследования диффузионных процессов и анализа газообразования, дается ряд практических рекомендаций.

Процессы, связанные с изменением и преобразованием энергии, изучаемые химической термодинамикой, в основе которой лежат два основных закона - первый, позволяющий судить о сохранении энергии, и второй - о возможности самопроизвольного развития процессов в данных физических условиях.

Термодинамическая система, представляющая собой систему “заготовка - инструмент – стружка” (ЗИС), элементы которой взаимодействуют между собой, мысленно обособленные от окружающей среды, обычно так в литературных источниках и рассматриваются. Однако термодинамическая система взаимодействует с окружающей средой (СОТС, атмосферный воздух). В данном случае система ЗИССо как незамкнутая рассматривается в контакте термодинамики неравновесных систем: $\Sigma M \neq \text{const}$, $\Sigma A \neq \text{const}$.

Как любая другая, система ЗИССо обладает термодинамическими свойствами, которые определяются различными физическими величинами (параметрами) - температура, энергия, внутренняя энергия, энтальпия, и т.д. В силу сложности процессов, происходящих при резании материалов, протекают как обратимые, так и необратимые превращения.

Анализ физико-химических особенностей процесса резания в охлаждаемой воздушной среде позволяет установить наличие двух физических явлений, связанных с необратимыми изменениями состояния энергии и вещества:

- сообщение и преобразование энергии;
- движение (превращение) вещества.

Вид, интенсивность и характер преобразования энергии - главное, что определяет процесс резания, так как без этого невозможен процесс разъединения, разрушения и пластического деформирования материала.

Изменение состояния вещества на различных этапах или различных уровнях рассматриваемого пространства сопровождается ее перераспределением [128,132,151,152,153]. Характер движения (переноса) вещества в области ЗИССо сильно меняется от процесса к процессу. Перенос вещества во внутренних слоях твердых материалов (заготовка и инструмент) без резания практически отсутствует. Единственным физическим видом изменения является рост зерна в нагреваемых слоях металла. Массоперенос или диффузия начинает наблюдаться уже на приповерхностных слоях материала, в пределах толщин окисных пленок или в деформируемых объемах стружки. Здесь наблюдается несколько видов диффузии:

- перераспределение дислокаций в приповерхностных слоях материалов и их движение;
- диффузия на около резцовых границах срезаемого слоя материала;
- перенос частиц обрабатываемого материала и инструмента, который является источником диффузионного износа;
- перенос частиц вещества (заготовки, инструмента или стружки) в направлении среды охлаждения с образованием или без образования новых химических связей;
- перенос составляющих среды охлаждения в направлении зоны резания, то есть в направлении источника развития температуры;
- перенос или перераспределение внутри рассматриваемого объема среды охлаждения с неоднородным составом и концентрацией при одинаковой температуре;
- перенос из атмосферы воздуха дополнительного объема газов и пополнение ими, вступивших в химическую реакцию в рассматриваемом приграничном с зоной резания элементарном объеме, газоздушного пространства.

Процесс деформирования и выход энергии, преобразованной в тепловую, тесно связан с разъединением атомов и преодолением сил сближения. Тепловая энергия, развивающаяся в зоне резания и сообщаемая

поверхностям атомов твердого тела, увеличивает вероятность развития электронных процессов взаимодействия. Общая энергия системы увеличивается, а на некоторых этапах снижается (при расплавлении металла) до уровня энергии атомов в решетке целого кристалла. Этот процесс связан с энергией активизации приповерхностных слоев, сообщающихся при резании, для обрыва межатомных связей металла и внешней среды с насыщением их свободных связей, и для повышения энергии поверхностных атомов до уровня энергетического барьера охватывания, то есть для перехода их в активное состояние. Активизация поверхностей металла увеличивает диффузию, физический адгезионный контакт и химическое взаимодействие при увеличении средней температуры. Протекающие процессы при резании металлов и их анализ позволяют установить наличие двух основных физических явлений связанных с изменением состояния энергии и вещества..

Математическое моделирование диффузии при резании металлов.

При решении задач теплофизики широко используют математическое описание температурных полей [91], возникающих в твердых телах под действием различных источников теплоты, в основе которого лежит следующее положение. Температурное поле, возникающее в твердом теле под действием движущегося или неподвижного источника теплоты любой формы, действующего временно или непрерывно, можно получить как результат той или иной комбинации температурных полей, возникающих под действием системы точечных мгновенных источников теплоты. Например, для неограниченного тела математическое выражение выглядит следующим образом [91,106]:

$$\theta(x, y, z, \tau) = \frac{Q}{\lambda \sqrt{\omega} (4\pi\tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4\omega\tau}\right]. \quad (1)$$

При значительных скоростях обработки материалов (точение, шлифование и т.д.) величина τ в предэкспоненциальном множителе (1) настолько мала, что значение экспоненты стремится к нулю, и температура

$\theta(x,y,z,\tau)$ любой точки тела с координатами x, y, z через τ секунд после того, или в точке с координатами X_k, Y_k, Z_k имел место тепловой импульс, то есть, возник и погас мгновенно точечный источник теплоты, также стремится к нулю. Это не отражает реальной картины изменения температуры тела за короткий промежуток времени для практических расчетов и является основной причиной использования других решений при расчете тепловых полей.

Основными очагами теплоты при резании являются, как известно, плоскости сдвигов в срезаемом деформируемом слое материала и зоны трения передней и задней поверхности инструмента со сходящей стружкой и обрабатываемой заготовкой соответственно.

В общем, виде уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q = Q_{д.} + Q_{т.з.} + Q_{тп} + Q_{уп} + Q_{ср} = Q_{стр} + Q_{и} + Q_{заг} + Q_{с.о.} \quad (2)$$

где $Q_{д.}$ - количество теплоты, выделяемое от пластического деформирования срезаемого слоя при превращении его в стружку;

$Q_{тз.}$ и $Q_{тп}$ - количество теплоты, выделяемое при трении материала с задней и передней поверхностью инструмента соответственно;

$Q_{уп}$ - теплота, обуславливающая появление в процессе резания упругих деформаций, преобразующихся в затухающие упругие колебания;

$Q_{ср.}$ - теплота, развивающаяся при образовании новой поверхности при резании;

$Q_{заг.}$, $Q_{и.}$, $Q_{стр.}$ и $Q_{с.о.}$ - соответственно теплота, разделяемая между элементами системы "заготовка - инструмент - стружка - среда охлаждения" (ЗИССо).

Как показывают исследования [49], при резании сталей основное количество тепла (до 80% и более) распространяется в срезаемую стружку, что определяет последнюю как носитель основной информации о процессе резания.

Сообщение внешней энергии для пластичного деформирования и разрушения слоя материала с преобразованием ее в тепловую вызывает протекание разнообразных физических и химических процессов в материале заготовки, на ее поверхности и на границе раздела гетерогенных фаз со средой охлаждения – структурные превращения и рекристаллизация, объемные и пространственные изменения, появление напряжений, пластических деформаций и т. д. Эти процессы оказывают качественное влияние на изменение физико-химических свойств и состояние материала.

Теория тепловых процессов в технологических системах при резании, разработанная и дополненная рядом известных ученых: М. И. Клушиным, А.Н. Резниковым, А.Д. Макаровым, Т. Н. Лоладзе и др., является лишь частью общей теории теплопроводности и физических процессов.

При пластическом деформировании кристаллической решетки материала в условиях резания нарушаются атомно-молекулярные связи, увеличивается избыточная энергия, которая преобразуется в тепловую. Преодоление сил трения ведет к дополнительным затратам энергии, которая, преобразуясь в тепловую, увеличивает количество образованной теплоты. То есть работу резания можно представить как энергию, затраченную на пластическое деформирование срезаемого слоя и превращением его в стружку, преодоление сил трения по задней и передней поверхностям режущего инструмента. Работой, затраченной на образование новой поверхности и работой сил, обуславливающих появление в процессе резания упругих деформаций, преобразующихся в затухающие колебания, можно пренебречь, так как это составляет небольшую часть работы [91], затраченной на резание.

Для определения количества тепла, выделенного при деформировании стружки и трении инструмента с заготовкой и стружкой, используя известные уравнения [49,91], без учета теплоотдачи в среду охлаждения, уравнение (2) теплового баланса принимает вид

$$Q = Q_{тп} + Q_{тз} + Q_{д} \quad (3)$$

Таким образом, суммарную мощность Q теплового источника можно рассматривать как сумму теплоты деформирования Q_d , теплоты трения на надрезцовой стороне стружки $Q_{ТП}$ и на поверхности контакта изделия с инструментом $Q_{ТЗ}$.

Закономерности теплового распределения и тепловой энергии при резании металлов. Мощность источника (тепловой поток) пропорциональна силе трения и скорости скольжения стружки относительно передней поверхности режущего инструмента, поэтому суммарную мощность в соответствии с [91] источника определяют по формуле

$$\Phi_{ТП} = 0,163 * F_{ТП} * \vartheta_c = 0,163 * F_{ТП} \frac{\vartheta}{\eta}, \quad (4)$$

где ϑ_c и ϑ - скорость скольжения стружки и скорость резания соответственно;

η – коэффициент продольной усадки стружки;

$F_{ТП}$ - значения силы трения передней поверхности инструмента со стружкой, определяемой в соответствии с законами механики процессов резания по формуле [91]:

$$F_{ТП} = (P_z - F_{ТЗ}) \sin \gamma + (P_N - N_3) \cos \gamma, \quad (5)$$

где P_z и P_N - тангенциальная и нормальная составляющие силы резания;

$F_{ТЗ}$ и N_3 - сила трения и нормальная сила, действующие на площадке контакта задней поверхности инструмента с изделием;

γ - величина переднего угла инструмента.

Отсюда выражение (4) принимает вид

$$\Phi_{ТП} = 0,163 \frac{v}{\eta} [(P_z - F_{ТЗ}) \sin \gamma + (P_N - N_3) \cos \gamma] . \quad (6)$$

Размерность составляющих силы резания выражают в кГ, а мощность источника $\Phi_{ТП}$ - в Дж/с. При этом

$$F_{T3} \approx N_3 \approx 0,252 * \sigma_B * \epsilon * \xi_3, \quad (7)$$

где σ_B - временное сопротивление разрыву обрабатываемого материала;

ϵ и ξ_3 -ширина и длина контакта инструмента с заготовкой.

для сталей

$$Cp_z = \text{const } \sigma_B^{0,35-0,75}, \quad (8,a)$$

для чугунов

$$Cp_z = \text{const HB}^{0,55}. \quad (8,b)$$

Более точные значения величины Cp_z для конструкционных сталей, полученные С.О. Глебовым, представлены в [23] и определяются по формуле

$$Cp_z = 0,77 * \sigma_B (\delta + 30), \quad (9)$$

где δ - относительное удлинение обрабатываемого материала.

Значение нормальной составляющей силы резания P_N определяют как

$$P_N = \sqrt{P_X^2 + P_Y^2}, \quad (10)$$

где P_X и P_Y -составляющие силы резания, определяемые по справочным данным, по условиям эксперимента или из литературных источников, например, [23]:

$$P_X = Cp_X * t^{1,2} * S^{0,55}, \quad (11)$$

$$P_Y = Cp_Y * t^{0,9} * S^{0,75}. \quad (12)$$

Значение коэффициентов Cp_X и Cp_Y также определяют по справочным данным.

Используя выражения (8), (12) и (13), получим формулу для расчета значений F_{TII}

$$F_{TII} = (Cp_z * t * S^{0,75} - 0,252 * \sigma_B * \epsilon * \xi_3) \sin \gamma + \left(\sqrt{Cp_X^2 * t^{2,4} * S^{1,1} + Cp_Y^2 * t^{1,8} * S^{1,5}} - 0,252 * \sigma_B * \epsilon * \xi_3 \right) \cos \gamma. \quad (13)$$

Подставляя (14) в выражение (4), получим формулу для определения мощности источника на надрезцовой стороне стружки

$$\Phi_{\text{тр}} = 0,163 \frac{v}{\eta} \left[\left(C_{p_z} * t * S^{0,75} - 0,252 * \sigma_B * \epsilon * \xi_3 \right) \sin \gamma + \left(\sqrt{C_{p_x}^2 * t^{2,4} * S^{1,1} + C_{p_y}^2 * t^{1,8} * S^{1,5}} - 0,252 * \sigma_B * \epsilon * \xi_3 \right) \cos \gamma \right] \quad (14)$$

Полученная формула (14) отражает изменение теплового потока при различных значениях режимов резания, износе режущего инструмента и материале обрабатываемого изделия.

Для описания температурных полей и закономерностей распределения температур в объеме сжимаемой стружки имеется ряд методик, представленных в различных литературных источниках.

На рисунке 1 представлена схема для анализа температур, развивающихся на контактной поверхности стружки с передней поверхностью режущего инструмента, в соответствии с методикой, изложенной в литературе [49,91].

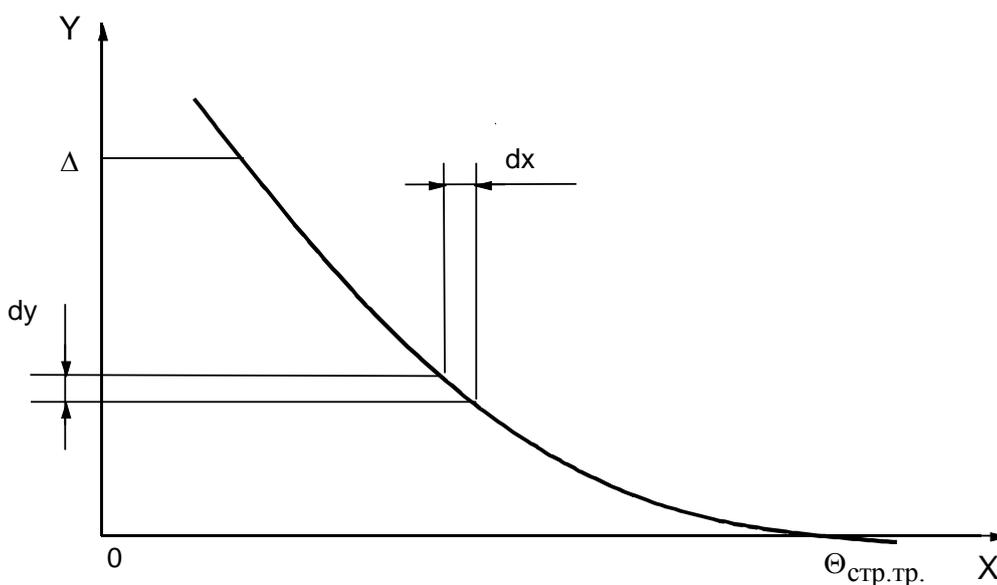


Рисунок 1 - Схема распределения температуры при контакте стружки с инструментом

Элементарная площадка стружки dx (рисунок 1) находится в контакте с передней поверхностью инструмента в течение некоторого времени $d\tau$, где осуществляется подвод теплоты трения. Начиная с некоторого момента, поддерживается постоянная температура стружки $\theta_{\text{стр.тр}}$, определяемая выражением [23]

$$\theta_{\text{стр.тр}}(\tau, y) = \theta_{\text{стр.тр}} \left(\frac{y}{\Delta} - \frac{2}{\pi} e^{-\frac{\pi^2 \omega}{\Delta^2}} \sin \frac{\pi y}{\Delta} \right), \quad (15)$$

где Δ - глубина проникновения теплоты трения за время контакта инструмента и стружки;

ω - температуропроводность стружки.

Время, в течение которого стружка находится в контакте с передней поверхностью инструмента, определяется из соотношения

$$\tau = \frac{\xi_{\text{п}} * \eta}{v}, \quad (16)$$

где $\xi_{\text{п}}$ - длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

Глубину проникновения теплоты трения Δ в стружку за время τ определяют по формуле

$$\Delta \approx 2,2\sqrt{\tau * \omega}. \quad (17)$$

Распространение теплоты трения в стружке в течение некоторого промежутка времени τ_k можно представить графически (рисунок 2).

Вычитаемая величина в выражении (10) при значениях y , соизмеримых с Δ , настолько мала, что при прочих равных условиях ей можно пренебречь.

Изменяя в соответствии с рисунком 2 направление оси OY , получим упрощенную формулу для определения температуры стружки трения.

$$\theta_{\text{стр.тр}}(\tau, y) \approx \theta_{\text{стр.тр}}\left(\frac{\Delta(\xi_{\text{п}}) - y}{\Delta(\xi_{\text{п}})}\right). \quad (18)$$

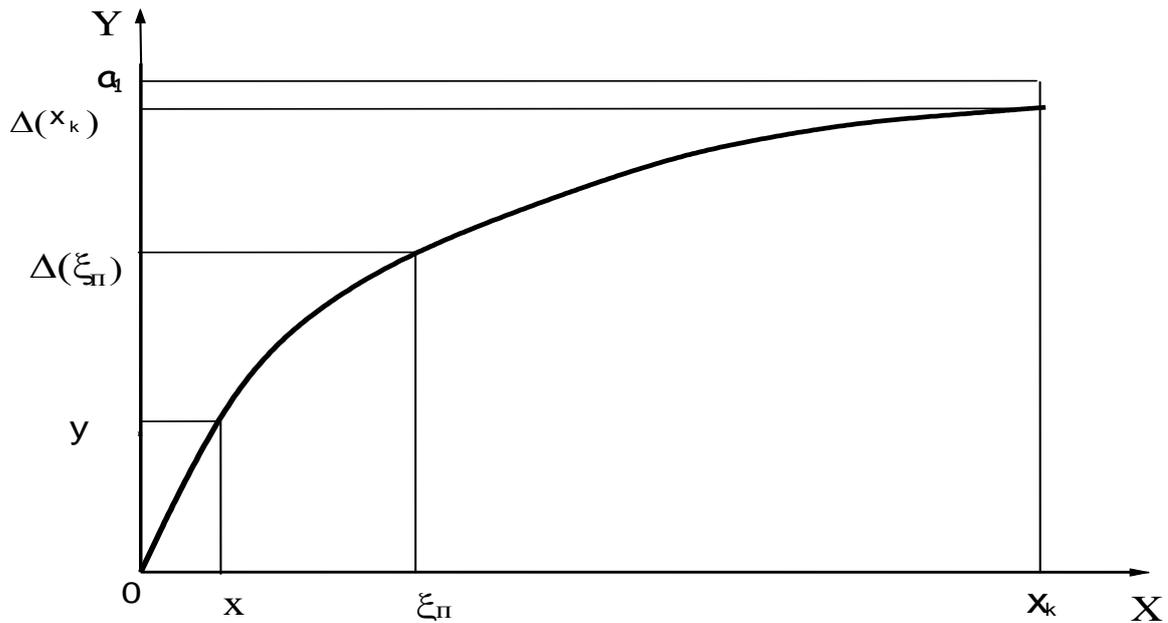


Рисунок 2 - Распределение теплоты трения в стружке при трении ее с инструментом и выходе ее из зоны контакта

Время контакта $\tau(\xi_{\text{п}})$ стружки с инструментом определяют по формуле (17), тогда глубина проникновения теплоты трения $\Delta(\xi_{\text{п}})$ за этот период в соответствии с (18) равна

$$\Delta(\xi_{\text{п}}) = 2,2\sqrt{\frac{a^* \eta}{\nu}} x, \quad (19)$$

а для любых значений Y справедливо выражение

$$y = 2,2\sqrt{\frac{a^*\eta}{\nu}}x. \quad (20)$$

Исходя из этого и выражения (2.42), имеем

$$\theta_{\text{стр.тр}}(\tau, y) \approx \theta_{\text{стр.тр}} \left(\frac{\sqrt{\xi_{\text{п}}} - \sqrt{x}}{\sqrt{\xi_{\text{п}}}} \right). \quad (21)$$

При отсутствии теплообмена стружки с окружающей средой в соответствии с законом сохранения энергии и правилом подобия в любой точке сечения стружки на длине \mathbf{OX} и можно определить температуру $\theta_{\text{стр.тр}}(\tau, y_k)$ по формуле

$$\theta_{\text{стр.тр}}(\tau, y_k) \approx \theta_{\text{стр.тр}} \frac{\Delta(\xi_{\text{п}})}{\Delta(x_k)} \left(\frac{\sqrt{\xi_{\text{п}}} - \sqrt{x}}{\sqrt{\xi_{\text{п}}}} \right), \quad (22)$$

или

$$\theta_{\text{стр.тр}}(\tau, y_k) \approx \theta_{\text{стр.тр}} \left(\frac{\sqrt{\xi_{\text{п}}} - \sqrt{x}}{\sqrt{x_k}} \right). \quad (23)$$

Полная температура стружки определяется суммой температуры трения $\theta_{\text{стр.тр.}}(\tau, y_k)$ и температуры деформации $\theta_{\text{д}}$ на прирезцовой поверхности и околорезцовом объеме. Тогда по абсолютной шкале температур

$$T_{\text{стр.тр.}}(\tau, y_k) = 273 + \theta_{\text{д}} + \theta_{\text{стр.тр.}} \left(\frac{\sqrt{\xi_{\text{п}}} - \sqrt{x}}{\sqrt{x_k}} \right). \quad (24)$$

Полученное математическое выражение (24) позволяет решить задачу определения температуры в стружке, развиваемую при ее деформировании и

трении с инструментом, а также после выхода из зоны контакта при отсутствии теплообмена.

Для определения θ_d и $\theta_{стр.тр.}$ можно использовать различные расчетные формулы, широко представленные в литературных источниках по тепловым полям при резании металлов. Однако, как показывают исследования [91] температура деформирования θ_d зависит от материала обрабатываемого изделия. Это связано с его твердостью, режимами обработки и физическими особенностями трения стружки с передней поверхностью режущего инструмента.

Затраченная при резании металлов работа преобразуется в тепловую энергию E , определяемую отношением количества теплоты Q к числу молей N_B данного вещества [157,163], т.е.

$$E = \frac{Q}{N_B}. \quad (25)$$

Число молей N_B любого вещества плотностью ρ и объемом V определяют по формуле

$$N_B = \frac{m}{M} = \frac{\rho * V}{M}, \quad (26)$$

где M - молярная масса вещества.

Количество теплоты Q , выделенное при трении инструмента со стружкой за путь L , пройденный резцом определяют из выражения

$$Q = 0,0098 * L * P_{NO}. \quad (27)$$

Объем стружки $V(\xi)$, в который распространяется теплота трения на глубину $\Delta(\xi)$ за время контакта ее с инструментом определяют по формуле

$$V(\xi_n) = S * \sin \varphi * 2,2 \sqrt{\frac{\omega * \eta * 100 * 60}{v * 1000}} \int_0^{\xi_n} \sqrt{x} \, dx. \quad (28)$$

Интегрируя данное выражение, получим

$$V(\xi_{\Pi}) = 3,59 * S * \sin \varphi * \xi_{\Pi} \sqrt{\frac{\omega * \eta * \xi_{\Pi}}{\nu}} . \quad (29)$$

Подставляя (26), (28) и (29) в формулу (25), имеем

$$E_{\text{тр}} = \frac{0,0098 * L * P_{\text{NO}} * M * \sqrt{\nu}}{3,59 * \rho * S * \sin \varphi * \xi_{\Pi} * \sqrt{\omega * \eta * \xi_{\Pi}}} . \quad (30)$$

Принимая $L = \eta * \xi_{\Pi}$, получим выражение для определения средней энергии трения, выделенной в стружку при контакте ее с инструментом на длине контактной поверхности ξ_{Π} :

$$E_{\text{тр}} = \frac{0,0027 * P_{\text{NO}} * M * \sqrt{\nu * \eta}}{\rho * S * \sin \varphi * \sqrt{\omega * \xi_{\Pi}}} . \quad (31)$$

Полученное математическое выражение (31) характеризует средние значения тепловой энергии трения $E_{\text{тр}}$, распределенной в стружку при контакте ее с инструментом в объеме, ограниченном глубиной проникновения теплоты трения $\Delta(\xi_{\Pi})$. В соответствие с этим выражением, например, при обработке стали 45 со скоростью резания $\vartheta = 1$ м/с, глубиной резания $t = 4$ мм, подачей $S = 0,49$ мм/об, расчетные значения $E_{\text{тр}} \approx 570$ кДж/моль.

Для определения значений тепловой энергии трения в любой точке околорезцового объема стружки необходимо рассмотреть закономерность проникновения теплоты трения над контактной поверхностью [49], представив графически на рисунке 3.

В соответствии с рисунком 3

$$V(x, \Delta(x)) = \epsilon * dx * \Delta(x) . \quad (32)$$

Элементарный объем $V(dx, d\Delta(x))$, в который распространяется теплота трения на участке dx глубиной $d\Delta(x)$ изменяется в зависимости от пути контакта x стружки с инструментом, тогда

$$V(dx, d\Delta(x)) = \epsilon * dx * \Delta'(x) . \quad (34)$$

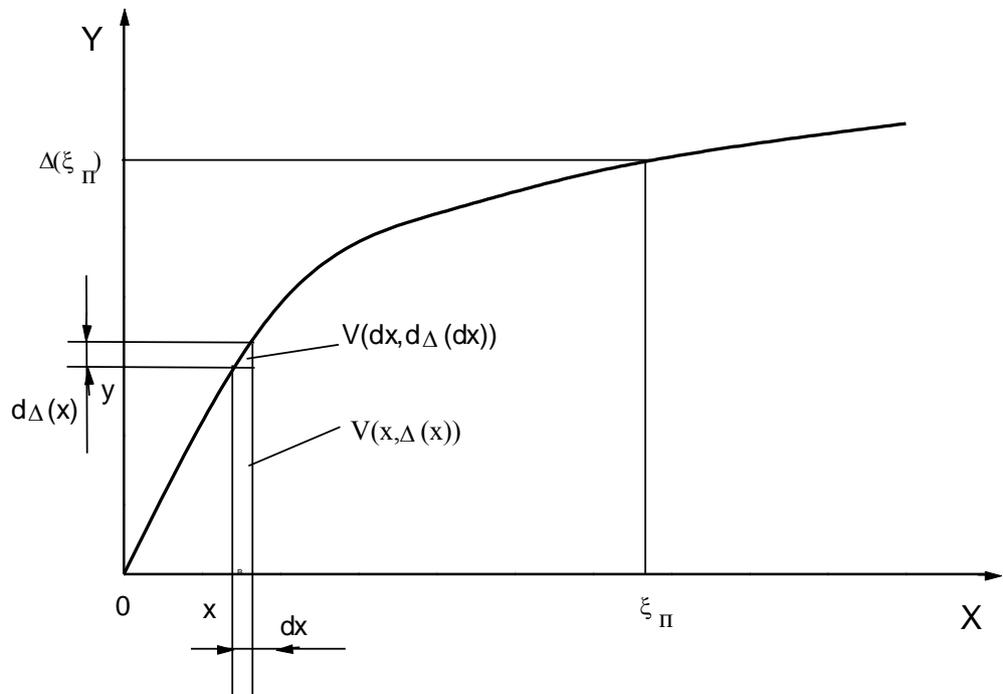


Рисунок 3 - Схема распространения теплоты трения и изменение элементарных объемов стружки, в которые распространяется энергия трения

Определяя производную $\Delta'(x)$, имеем

$$V(dx, d\Delta(x)) = \epsilon * dx * 2,7 \sqrt{\frac{\omega * \eta}{\nu * x}} . \quad (35)$$

Количество теплоты Q , выделенное за период контакта инструмента со стружкой определяют в соответствии с (2.27) из условия

$$Q(\xi_{\Pi})_{\text{тр}} = \frac{0,0098 * F_{\text{тр}} * \xi_{\Pi}}{\eta} , \quad (36)$$

тогда на участке длиной dx выделяется теплота трения равная

$$Q(dx)_{\text{тр}} = \frac{0,0098 * F_{\text{тр}} * dx}{\eta} \quad (37)$$

Отсюда, количество теплоты, выделенное за период контакта стружки с инструментом на длине dx и распределенное в элементарный объем $d\Delta(x)$ определяют по формуле

$$Q(dx, d\Delta(x)) = Q(\xi_{\text{п}})_{\text{тр}} \frac{dx}{\xi_{\text{п}}} * \frac{d\Delta(x)}{\Delta(x)} \quad (38)$$

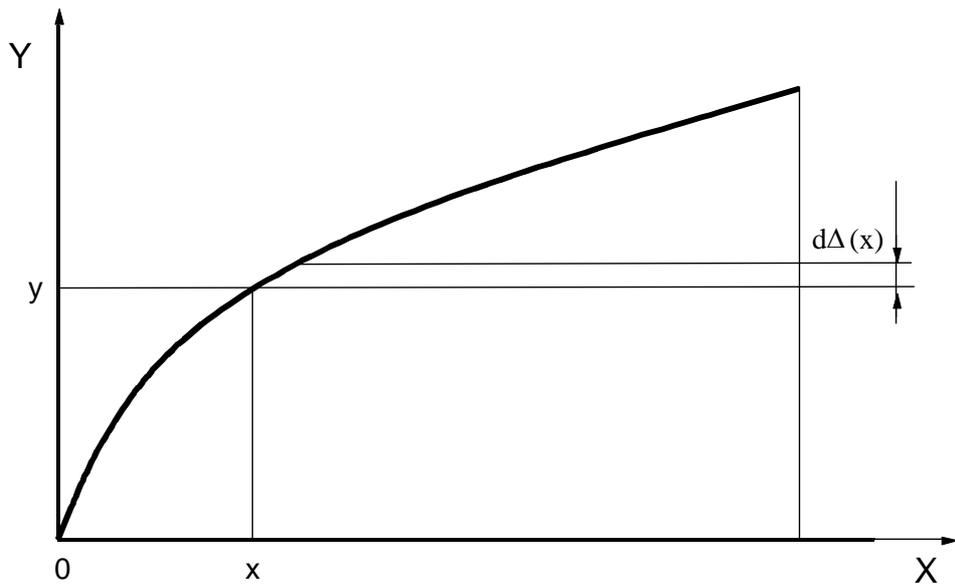


Рисунок 4 - Распространение теплоты трения в объеме стружки, ограниченном глубиной проникновения теплоты трения $d\Delta(x)$ и длиной контакта на участке $(x; \xi_{\text{п}})$

Из выражения (38) можно определить, какое количество теплоты выделяется в элементарный объем стружки глубиной $d\Delta(x)$ за период ее контакта с инструментом с момента ее проникновения на глубину $\Delta(x)$ до выхода стружки из зоны контакта, т.е. на участке $(x; \xi_{\text{п}})$ (рисунок 4).

Интегрируя выражение (38), при условии $\Delta(x) < \Delta < \Delta(\xi_{\text{п}})$, получим

$$Q(\xi_{\text{п}}, y) = Q(\xi_{\text{п}})_{\text{тр}} \frac{dx}{\xi_{\text{п}}} d\Delta(x) \int_{\Delta(x)}^{\Delta(\xi_{\text{п}})} \frac{d\Delta}{\Delta} \quad (39)$$

Отсюда имеем

$$Q(\xi_{\text{п}}, y) = Q(\xi_{\text{п}})_{\text{тр}} \frac{dx}{\xi_{\text{п}}} \left(\frac{\sqrt{\xi_{\text{п}}} - \sqrt{x}}{\sqrt{x}} \right). \quad (40)$$

В соответствии с выражением (36) и (40) можно определить значения тепловой энергии трения, распределенной в любой точке стружки при контакте ее с инструментом, с координатами $(\xi_{\text{п}}, Y)$

$$E(\xi_{\text{п}}, y) = \frac{M * Q(\xi_{\text{п}}, y)}{\rho * V(dx, d\Delta(x))}. \quad (41)$$

Отсюда

$$E(\xi_{\text{п}}, y) = \frac{0,0036 * M * \sqrt{v} (\sqrt{\xi_{\text{п}}} - \sqrt{x}) * F_{\text{тр}}}{\rho * S * \sin \varphi * \sqrt{\omega * \eta^3}}. \quad (42)$$

Необходимость использования полученного математического выражения (42) возникает в случае, когда следует более точно определить значения распределенной тепловой энергии трения в любом микрообъеме стружки на момент выхода ее из зоны контакта с инструментом. При упрощенных расчетах, когда температуру трения стружки принимают усредненной и постоянной в течение всего периода контакта инструмента со стружкой, достаточно для поставленной задачи использовать выражение (31).

При контакте режущего инструмента с обрабатываемой заготовкой при резании возникают силы как результат упруго-пластического взаимодействия, которые определяют выделение тепла на площадке контакта. Мощность источника $\Phi_{\text{тз}}$ в этом случае определяют по формуле [91]

$$\Phi_{\text{тз}} = 0,041 * \delta_{\text{в}} * v * \epsilon * \xi_{\text{з}}, \quad (43)$$

где ϵ и $\xi_{\text{п}}$ - ширина и длина контактной поверхности соответственно.

В результате действия внешних сил происходит выделение теплоты трения и распределение тепловой энергии в инструмент, заготовку и стружку. Теплота трения, распределяемая в результате контакта, проникает в объем на глубину Δ_3 , которая может быть определена по формуле (18), имеющей вид

$$\Delta_3 = 2,2 \sqrt{\frac{\xi_3 * \omega}{\nu}} . \quad (44)$$

При известных значениях ширины контакта σ и длины $\xi_п$ можно определить скорость формирования объема, в который распределяется теплота трения, по формуле

$$J_{тз} = \nu * \sigma * \Delta_3 , \quad (45)$$

или

$$J_{тз} = 5,39 * \sigma * \sqrt{\omega * \nu * \xi_3} . \quad (46)$$

Отсюда можно определить значения тепловой энергии трения, которая выделяется при контакте заготовки с задней поверхностью инструмента в соответствии с выражением

$$E = \frac{M * \Phi_{тз}}{\rho * J_{тз}} . \quad (47)$$

Подставляя (43) и (46) в формулу (47) получим

$$E_{тз} = \frac{0,076 * M * \sigma_B \sqrt{\nu * \xi_3}}{\rho \sqrt{\omega}} . \quad (48)$$

Как следует из выражения (48) при незначительных величинах износа инструмента по задней грани энергия трения достигает существенных значений, превышающих энергию активации многих примесей, диффундирующих в металле.

Для определения средней температуры на площадке контакта инструмента с заготовкой можно использовать расчетные формулы, представленные в литературе [23].

При постоянной скорости \mathbf{v} обработки заготовки из определенного материала, значения тепловой энергии трения $E_{ТЗ}$ зависят только от длины контактной поверхности. Например, для стали 45 $\sigma_B=61\text{кг/мм}^2$, плотностью $\rho=7,8\cdot 10^{-3}\text{г/мм}^3$, теплопроводностью $\omega=0,08\text{см}^2/\text{с}$, молекулярной массой $M=56\text{г/моль}$ и обрабатываемой со скоростью $v=2\text{ м/с}$, выражение (48) имеет вид

$$E_{ТЗ} \approx 1,3 \cdot 10^6 \sqrt{\xi_3} . \quad (49)$$

Таким образом, при обработке выбранной стали с определенной скоростью \mathbf{v} , тепловая энергия трения $E_{ТЗ}$ зависит от квадратного корня из длины контакта $\xi_{п}$ инструмента с заготовкой.

Процесс стружкообразования происходит с момента формирования плоскости сдвига, поэтому деформации элементарных объемов стружки, расположенных у этой плоскости, примерно одинаковые [91]. Исключение составляют участки, расположенные в непосредственной близости от режущей кромки, но их значение невелико. Поэтому в первом приближении можно считать, что температура деформации и энергия деформации распределены по обе стороны плоскости сдвига равномерно. Следовательно, постоянной является и интенсивность, возникающего здесь, источника теплоты.

На рисунке 5 представлено распределение температуры и энергии деформации $E_{д}$ на момент начала деформирования стружки.

При отсутствии теплообмена с окружающей средой значение температуры деформирования определяют по формуле [91]

$$\theta_{д} = 0,6 \frac{\omega^* \eta}{\lambda^* v} b^* \cdot q_{д}, \quad (50)$$

где λ - коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала;

b^* -относительный коэффициент отвода теплоты деформации, уходящей со стружкой;

q_d - интенсивность источника теплоты деформации.

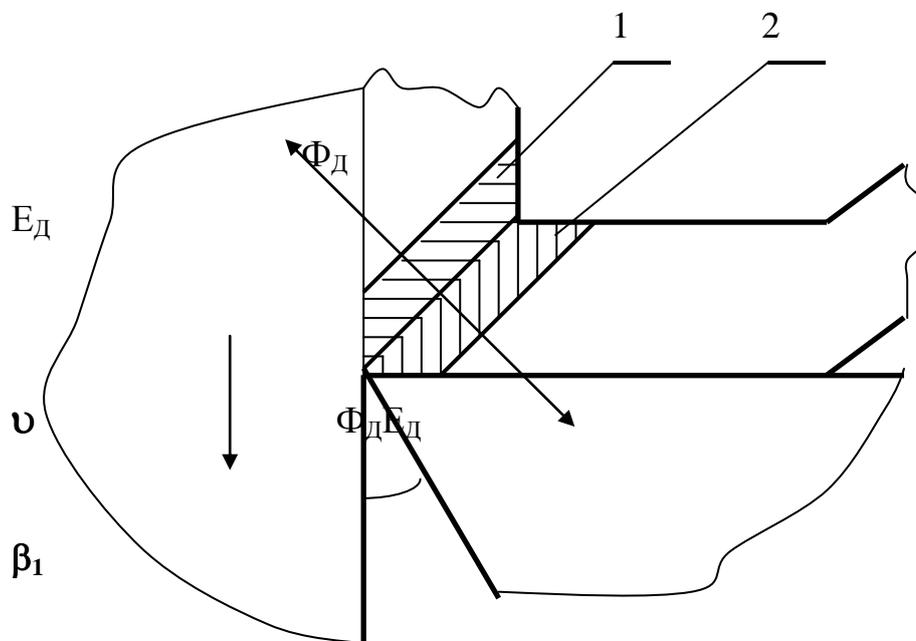


Рисунок 5 - Распространение тепла при стружкообразовании:

1 - элементарный объем до деформации; 2 - элементарный объем после деформации.

Значения q_d и b^* определяют по формулам

$$b^* = \frac{1}{1 + 3,26\eta\sqrt{\frac{\omega^* \sin\beta_1}{v^* a}}}, \quad (51)$$

$$q_d = 3,9 \frac{v^* \sin\beta_1}{a^* v^* \eta} [P_{ZO} (\eta - \sin\gamma) - P_{NO} \cos\gamma], \quad (52)$$

где $a^* v^* = t^* s$, а значения $\sin\beta_1$ определяют по формуле

$$\sin\beta_1 = \frac{\cos\gamma}{\sqrt{\eta^2 - 2\eta\sin\gamma + 1}}. \quad (53)$$

Тогда выражение (50) для определения температуры деформации T_d стружки по абсолютной шкале принимает вид

$$T_d = 273 + \frac{2,34 * \omega * \cos\gamma [P_{ZO}(\eta - \sin\gamma) - P_{NO} \cos\gamma]}{\lambda * S * t \sqrt{\eta^2 - 2\eta\sin\gamma + 1} \left(1 + 3,26\eta \sqrt{\frac{\omega * \cos\gamma * \sin\varphi}{v t \sqrt{\eta^2 - 2\eta\sin\gamma + 1}}} \right)}. \quad (54)$$

Тепловую мощность (теплоту деформации) Φ_d определяют вычитанием от общей тепловой мощности $\Phi_0 = 0,163 * P_z * v$ величин $\Phi_{тн}$ и $\Phi_{тз}$, т.е.

$$\Phi_d = 0,163 \frac{v}{\eta} [(P_z - F_{тз})(\eta - \sin\gamma) - (P_N - N_3) \cos\gamma]. \quad (55)$$

При отсутствии износа задней поверхности режущего инструмента и значениях переднего угла $\gamma=0$

$$\Phi_d = 0,163 * \frac{v}{\eta} (P_z \eta - P_N). \quad (56)$$

Скорость снимаемого объема стружки J_v в единицу времени определяется размерами сечения по формуле

$$J_v = \frac{1000 * v_c}{60} a * b = 16,67 * v * S * t. \quad (57)$$

В соответствии с выражениями (25) и (26) значения тепловой энергии определяют по формуле

$$E_d = \frac{0,0098 * M [(P_z - F_{тз})(\eta - \sin\gamma) - (P_N - N_3) \cos\gamma]}{\rho * S * t * \eta}. \quad (58)$$

При отсутствии износа задней поверхности режущего инструмента и значениях переднего угла $\gamma=0$

$$E_d = \frac{0,0098 * M [P_z * \eta - P_N]}{\rho * S * t * \eta}. \quad (59)$$

Для ряда сталей выражение (2.81) в упрощенном виде имеет вид

$$E_{д} = \frac{70,2[P_{z} * \eta - P_{N}]}{S * t * \eta} \quad (60)$$

Подставляя существующие значения составляющих силы резания P_Z и P_N в выражения (58) и (60), а также полученные опытным путем коэффициенты усадки стружки η , можно определить значения тепловой энергии деформации $E_{д}$, которая в значительной степени зависит от размеров сечения срезаемого слоя, т.е. от подачи S и глубины резания t .

Полученное математическое выражение (58) позволяет определить величину $E_{д}$ расчетным путем для полученных значений составляющих силы резания P_Z и P_N , пользуясь как справочными данными, так и полученных в ходе эксперимента.

Зная закон распространения теплоты и формирование температурных полей, можно определить период выравнивания температур после выхода стружки из зоны контакта с режущим инструментом.

После действия источника теплоты наступает период выравнивания температур и теплота, введенная ранее, продолжает распространяться в теле, затем уходит в среду охлаждения. Температуру в период выравнивания можно определить путем использования фиктивного источника и сгона теплоты [106]. Формальное введение фиктивных источников и сгонов теплоты необходимо лишь для удобства численного определения приращения температуры в период ее выравнивания.

Приращение температуры можно определить через произведения приращения температуры в предельном состоянии и коэффициент теплонасыщения, полученный опытным путем.

В связи с этим вытекает гипотеза о повышении температуры стружки вследствие трения ее с инструментом и после выхода стружки из зоны контакта. Так, первым признаком повышения температуры является деформирование срезаемого слоя, затем – трение инструмента со стружкой и изделием, и в конечном итоге – повышение температуры вследствие

химического взаимодействия ее поверхностных слоев с кислородом атмосферного воздуха. Визуальные наблюдения схода сливной стружки из зоны контакта ее с инструментом, показывают изменение радужной оболочки, что характерно при завышенных режимах обработки. Это объясняется следующим:

- при распространении тепла по объему стружки происходит увеличение средней температуры наружных поверхностей, что подтверждается расчетными формулами;

- наружные поверхности стружки, особенно поверхность, которая вышла из зоны контакта с инструментом, нагретые до высоких температур, контактирует с кислородом атмосферного воздуха, что приводит к образованию окисных пленок с выделением тепловой энергии, повышающей суммарной тепловой поток, а следовательно к повышению средней температуры стружки.

Таким образом, увеличение средней температуры стружки при ее теплонасыщении сопровождается дополнительным подводом тепла за счет химического взаимодействия атмосферного кислорода с поверхностью стружки, то есть горение стружки в кислороде дополнительно увеличивает ее среднюю температуру. Исследование температуры и тепловых полей зоны резания выполнены коллективами и отдельными исследователями в различное время: Л.А. Резниковым, С.Г. Редько, С.С. Силиным, А.В. Темниковым, Н.В. Талантовым и др., которые получили ряд зависимостей температуры от скорости распространения температурного поля при различных параметрах обработки. Возникновение одного или другого эффекта изменения температуры лежит в довольно узких пределах, потому умение создавать необходимое температурное поле в зоне резания может обеспечить высокотемпературную обработку, как, например, подогрев поверхностного слоя при точении из жаропрочных сплавов [66]. Поэтому в зависимости от поставленной задачи следует использовать ту или иную методику для расчета тепловых полей.

Математическое моделирование диффузии примесей при изменении условий резания

Решение уравнения (2.91) принимает различный вид в зависимости от начальных и граничных условий. Этот случай обычно реализуется при исследовании диффузии примесных атомов из газовой фазы или из нанесенного на поверхность образца толстого слоя, когда на границе образца в течение всего диффузионного отжига поддерживается постоянная концентрация примеси. В этом случае начальные и граничные условия следующие

$$\begin{cases} N(0, \tau) = N_0; \\ N(z, 0) = 0. \end{cases} \quad (62)$$

Уравнение (2.91) второго закона Фика имеет следующее решение [12,34]

$$N(z, \tau) = N_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{D * \tau}} \right) \right], \quad (63)$$

где N_0 - начальная концентрация примесей в металле;

$N(z, \tau)$ - концентрация диффундирующих примесных атомов;

Z - ширина диффундирующего слоя;

τ - время диффузии;

D - коэффициент диффузии;

erf - функция ошибок Гаусса, которая определяется выражением

$$\operatorname{erf}U = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-v^2) dv. \quad (64)$$

Выражение (2.101) можно представить в виде дополнительной функции ошибок erfc , где

$$\operatorname{erfc}U = 1 - \operatorname{erf}U. \quad (65)$$

Тогда

$$N(z, \tau) = N_0 * \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{D * \tau}}\right). \quad (66)$$

Коэффициент диффузии **D** при расчете концентрационных профилей определяют по формуле (2.93). При наличии внешнего воздействия, когда происходит пластическое или хрупкое разрушение кристаллической решетки обрабатываемого материала, процесс диффузии носит иной характер, чем при термическом воздействии на материал, то есть в результате стружкообразования возникновение локальных температур и формирование температурных полей является результатом разрушения кристаллической решетки металла под действием внешних сил.

Поэтому совершаемая механическая работа преобразуется в тепло, а тепловая энергия распределяется по деформируемому объему. Отсюда диффузия примесных элементов будет проходить из внутренних объемов в направлении наружных поверхностей срезаемого слоя и носит безактивационный характер. Тогда выражение (2.93) принимает вид

$$D = D_0 * \exp(E / RT). \quad (67)$$

Время диффузии τ примесных атомов определяется периодом действия внешних сил, когда поток диффундирующих элементарных частиц наибольший.

Определив значение концентрации $N(z, \tau)$ диффундирующих атомов, можно рассчитать скорость сжимаемого объема материала, в котором произошли диффузионные процессы. Тогда при стружкообразовании

$$J(z, \tau) = \frac{N(z, \tau) * v * z * y}{N_0 * \eta}, \quad (68)$$

где v - скорость резания;

z и y - размеры сечения срезаемого слоя.

В выражении (2.104) время диффузии τ_d при стружкообразовании определяется периодом действия силы резания, который связан с глубиной срезаемого слоя a (глубиной резания t), т.е.

$$\tau_{\text{д}} = \frac{a * \eta}{v} = \frac{t * \eta}{v * \sin \varphi}, \quad (69)$$

где φ - величина главного угла в плане.

Ширина диффундирующего слоя определяется шириной среза ϵ (подачей S). Поэтому для определения концентрации диффундирующих атомов в течение периода действия внешних сил деформирования срезаемого слоя выражение (66) имеет вид

$$N(s, \tau)_{\text{д}} = N_0 * \operatorname{erfc} \left(\frac{b}{2\sqrt{D_{\text{д}} * \tau_{\text{д}}}} \right), \quad (70)$$

где $D_{\text{д}}$ - коэффициент диффузии при деформации срезаемого слоя;
 $\epsilon = s * \sin \varphi$ -ширина деформируемого слоя.

С учетом (2.105) и (2.106) выражение (2.108) принимает вид

$$N(s, \tau)_{\text{д}} = N_0 * \operatorname{erfc} \left(\frac{s * \sin \varphi}{2\sqrt{\frac{t * \eta}{v * \sin \varphi} D_0 * \exp \left(\frac{E_{\text{д}}}{RT_{\text{д}}} \right)}} \right), \quad (71)$$

где $E_{\text{д}}$ - распределенная тепловая энергия деформирования;
 $T_{\text{д}}$ - температура стружки по абсолютной шкале, развивающаяся при деформировании срезаемого слоя.

Полученное математическое выражение (71) отображает процессы диффузии примесных атомов без учета их взаимодействия со средой охлаждения при различных режимах обработки металлов.

При обработке ряда сталей и чугунов средней плотностью $\rho = 7,8 * 10^{-6}$ кг/мм³ = 7,8 * 10⁻³ г/мм³ с молекулярной массой $M = 56$ г/моль и коэффициентом диффузии D_0 , выраженным в мм²/с, выражение (2.109) принимает вид

$$N(s, \tau)_d = N_o * \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2 * s \sqrt{v * \sin^3 \varphi}}{\sqrt{t * \eta}} * \left[D_o \exp \left(\frac{8,45 * (P_{zo} (\eta - \sin \gamma) - P_{NO} \cos \gamma) * b^*}{S * t * \eta \left[273 + \frac{2,34 * \omega * b^* \cos \gamma}{\lambda * S * t \sqrt{\eta^2 - 2\eta \sin \gamma + 1}} (P_{zo} (\eta - \sin \gamma) - P_{NO} \cos \gamma) \right]} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} .(72)$$

При отсутствии износа режущего инструмента и значениях переднего угла $\gamma=0$

$$N(s, \tau)_d = N_o * \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2 * s \sqrt{v * \sin^3 \varphi}}{\sqrt{t * \eta}} * \left[D_o \exp \left(\frac{8,45 * (P_z \eta - P_N) * b^*}{S * t * \eta \left[273 + \frac{2,34 * \omega * b^*}{\lambda * S * t \sqrt{\eta^2 + 1}} (P_z \eta - P_N) \right]} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} .(73)$$

Таким образом, полученные математические модели (71), (72) и (73) позволяют определить концентрацию диффундирующих примесей при любых условиях обработки различных материалов и износе режущего инструмента.

В зависимости от различных факторов изменяется абсолютная величина силы резания, которая оказывает влияние на процесс диффузии при формировании стружки. Среди многочисленных факторов, влияющих на величину силы резания, наиболее важным являются размеры сечения срезаемого слоя материала и геометрические параметры режущего инструмента.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования [23] увеличение силы резания напрямую связано с размерами сечения срезаемого слоя. Так при увеличении глубины и/или ширины срезаемого слоя сила резания возрастает, при уменьшении - снижается.

Зависимость влияния скорости резания носит неоднозначный характер. При низких скоростях резания силы резания значительные. По мере увеличения скорости сила резания и ее составляющие уменьшаются до определенных значений, затем увеличиваются и опять несколько снижаются. Это, по мнению ряда исследователей, может объясняться периодически появляющимся наростом, образующимся на передней поверхности инструмента, который оказывает большое влияние на процесс стружкообразования, изменяя направление отхода отделяемого слоя металла при превращении его в стружку, т.е. угол отхода стружки.

Влияние переднего угла инструмента γ на силы резания такое же, как и его влияние на коэффициент усадки стружки. Увеличение переднего угла инструмента ведет к уменьшению сил резания, а его уменьшение - к росту сил резания. Установлено влияние угла резания δ на величину сил резания [92], которые возрастают с увеличением δ . При этом силы P_x и P_y растут быстрее, чем сила P_z .

Влияние заднего угла α на величину сил резания незначительно, например, при обработке стали 45 увеличение α с 12° до 18° уменьшает силы резания на 6-17% [92].

Существенное влияние на величину сил резания P_z и P_y оказывает радиус скругления при вершине резца r . Увеличение r ведет к росту длины криволинейного участка режущей кромки, обуславливающего увеличение работы деформации и сил резания: так, увеличение r от 0,5 до 5 мм при обработке конструкционной стали, сопровождается ростом P_z и на 27%, P_y на 200% [92].

Изменение угла наклона главной режущей кромки λ от -5° до $+5^\circ$ практически не влияет на силы резания; а увеличение λ до $+45^\circ$ сопровождается существенным ростом сил.

Величина главного угла ϕ инструмента связывает ширину среза b с подачей S и глубину среза a с глубиной резания t ($a \cdot b = s \cdot t$), т.е. не является тем фактором, который изменяет существенно силу резания, но оказывает влияние на формирование теплового потока и величину распределенной тепловой энергии.

Износ задней поверхности инструмента оказывает влияние на увеличение силы резания и на концентрацию диффундирующих атомов, так как происходит увеличение средней температуры в зоне резания.

Увеличение твердости обрабатываемого материала приводит к росту сил резания и является также одним из основных факторов, влияющих на возрастание концентрации диффундирующих частиц.

Повышение подачи S и глубины резания t приводит к повышению силы резания и ее составляющих. Изменение размеров сечения срезаемого слоя влияет на температуру стружки деформирования T_d , коэффициент диффузии D_d и концентрацию $N(s, \tau)_d$ диффундирующих атомов, рассчитываемую по формуле (72).

Для исследования влияния размеров сечения на процессы диффузии рассмотрим в качестве примера изменение концентрации $N(s, \tau)_d$ от сил резания, зависящими от подачи S и глубины резания t , при обработке стали 45.

При скорости резания $v=1,0$ м/с стали 45, имеющей значения коэффициентов температуропроводности $\omega=0,08 \text{ см}^2/\text{с}=8 \text{ мм}^2/\text{с}$ и теплопроводности $\lambda=0,096$ кал/см*с*град, относительный коэффициент отвода теплоты b^* определяются в соответствии с выражением (52), тогда

$$b^* = \frac{1}{1 + 0,1\eta \sqrt{\frac{1}{t\sqrt{\eta^2 + 1}}}}. \quad (74)$$

Определив значения относительного коэффициента отвода теплоты b^* в стружку по формуле (74) для различных значений η и t можно рассчитать концентрацию $N(S, \tau)_d$ диффундирующих атомов по формуле (75), которая для, представленных выше, режимов обработки принимает вид

$$\frac{N(s, \tau)_d}{N_o} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{1,21 * s \sqrt{v}}{\sqrt{t * \eta}} * \left[D_o \exp \left(\frac{8,45 * (P_z \eta - P_N) * b^*}{S * t * \eta \left[273 + \frac{1,95 * b^*}{S * t \sqrt{\eta^2 + 1}} (P_z \eta - P_N) \right]} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (75)$$

При обработке материалов зависимость коэффициента усадки стружки η от размеров сечения срезаемого слоя носит неоднозначный характер. Это связано с природой трения контактирующих поверхностей. Ширина среза несущественно оказывает влияние на коэффициент трения, а, следовательно, и на коэффициент усадки стружки η . Это проявляется лишь при малых отношениях ширины среза vk его толщине a . Обработка металлов инструментами, оснащенными твердым сплавом, осуществляется обычно без образования нароста, а влияние условий резания характеризуется более простыми зависимостями. Поэтому с увеличением ширины среза эти характеристики процесса стружкообразования практически не изменяются в том случае, если ширина среза существенно больше его толщины [23]. Влияние толщины среза на коэффициент трения связано с изменением удельных нормальных нагрузок на передней поверхности. Толщина срезаемого слоя на процесс стружкообразования влияет подобно скорости резания, то есть при одних и тех же скоростях резания \mathfrak{V} и подаче S коэффициент усадки стружки η для различных глубин резания t

приблизительно одинаковый. В связи с этим следует обратить внимание на влияние ширины среза b (подачи S) на усадку стружки и диффузию примесных частиц.

Значения коэффициентов усадки стружки η в реальных условиях резания определялись в условиях проводимых экспериментов, а составляющие силы резания рассчитаны с использованием формул (7), (12) и (13).

При глубине резания $t=4\text{мм}$ значения относительного коэффициента отвода теплы в стружку b^* определяют по формуле (74), которая принимает вид

$$b^* = \frac{1}{1 + 0,06\eta \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\eta^2 + 1}}}}, \quad (76)$$

а выражение (2.113) выглядит следующим образом

$$\frac{N(s, \tau)_д S}{N_0} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{4,7 * S}{\sqrt{\eta}} * \left[D_0 \exp \left(\frac{2,11 * (P_z \eta - P_N) * b}{S * \eta \left[273 + \frac{0,49 * b}{S \sqrt{\eta^2 + 1}} (P_z \eta - P_N) \right]} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (77)$$

Для различных примесей, диффундирующих в металле, коэффициент диффузии D_0 имеет соответствующие значения. Например, при диффузии углерода в железе $D=2*10^{-6}\text{м}^2/\text{с}=2\text{мм}^2/\text{с}$.

Таблица 1- Расчетные и экспериментальные данные относительной концентрации $N(S, \tau)_{дS}/N_0$ диффундирующих атомов углерода в стали 45 при различных значениях подачи S

Подача S ,	Коэффициент	P_z , кг	P_N , кг	$N(S, \tau)_{дS}/N_0$	$D, \text{мм}^2/\text{с}$
--------------	-------------	------------	------------	-----------------------	---------------------------

мм/об	усадки η				
0,125	2,35	134,5	102	0,91	23,84
0,2	2,3	191,5	137	0,85	21,31
0,35	2,4	291	196	0,74	18,96
0,49	2,3	375	244	0,61	17,02

В таблице 1 представлены расчетные и экспериментальные данные при точении стали 45 с $\sigma_B=61\text{кг/мм}^2$ инструментом, оснащенным пластинами из твердого сплава T15K6 без учета износа его задней поверхности и углами $\varphi=45^\circ$ и $\gamma=0$ со скоростью резания $\vartheta=1$ м/с на различных подачах S . При глубине $t=4\text{мм}$ значения коэффициента $b^*=0,93$ при соответствующих режимах обработки стали 45.

Как следует из таблицы 1 концентрация диффундирующих атомов углерода в стали 45 в течение действия внешних сил уменьшается. Так как подача S определяет ширину диффундирующего слоя, то при ее увеличении возрастает длина пробега, что уменьшает концентрацию диффундирующих атомов. Кроме этого при постоянной глубине среза a (глубине резания t) удельные нагрузки, как и распределенная энергия снижаются.

При постоянной скорости резания ϑ и подаче S с увеличением глубины резания t коэффициент усадки стружки η уменьшается незначительно, особенно при пониженных скоростях резания. Поэтому принимаем для $\vartheta=1\text{м/с}$ и подаче $S=0,2$ мм/об среднее значение коэффициента $\eta=2,3$. Однако увеличение глубины резания отражается на значениях относительного коэффициента отвода тепла b^* в стружку. В соответствии с формулой (52) при установленных режимах точения стали 45 имеем

$$b^* = \frac{1}{1 + \frac{0,145}{\sqrt{t}}} \quad (78)$$

Выражение для определения относительной концентрации диффундирующих атомов при деформации стружки при различных значениях глубины резания t и установленных режимах обработки имеет вид

$$\frac{N(s, \tau)_{dt}}{N_o} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{1,24}{\sqrt{t}} * \left[D_o \exp \left\{ \frac{18,36 * b^* (2,3P_z - P_N)}{t \left[273 + \frac{3,89 * b^*}{t} (2,3P_z - P_N) \right]} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (79)$$

Полученные расчетным путем данные по формуле (79) представлены в таблице 2 для различных глубин резания t .

Таблица 2 - Расчетные значения коэффициентов диффузии D и относительной концентрации $N(S, \tau)_{dt}/N_o$ диффундирующих атомов углерода при различных глубинах резания t

Глубина резания t , мм	b^*	P_z , кг	P_N , кг	D , мм ² /с	$N(S, \tau)_{dt}/N_o$
0,5	0,83	26	16	22,08	0,60
1,0	0,87	52	32	23,34	0,72
2,0	0,90	104	66	23,97	0,80
4,0	0,93	208	132	24,91	0,86
6,0	0,94	312	212	24,43	0,89

Как следует из таблицы 2 концентрация $N(S, \tau)_{dt}$ диффундирующих атомов углерода при повышении глубины резания t и прочих равных условиях резания возрастает, что является следствием увеличения удельных сил резания и времени диффузии. Таким образом, изменение глубины резания влияет на концентрацию диффундирующих примесей, которую можно определить в соответствии с математическим выражением (79).

Сила резания при обработке различных материалов зависит от их физико-механических свойств, основными из которых являются предел прочности σ_B и твердость $HВ$. При обработке более мягких металлов, т.е. с относительно низкой твердостью, сила резания будет меньше, чем при обработке более твердых, и наоборот. Соответственно процесс диффузии будет зависеть от силы резания и температуры в зоне резания. С повышением твердости обрабатываемых материалов возрастает не только тепловой поток, но и температура деформирования T_d стружки, которая еще является и функцией температуропроводности ω обрабатываемого материала, может, как уменьшаться, так и увеличиваться. Например, при точении со скоростью резания $v = 1$ м/с. подачей $S = 0,49$ мм/об и глубиной резания $t = 4$ мм без износа режущего инструмента расчетные значения для стали 10 $T_d = 546$ К, для стали 45 $T_d = 499$ К, а для стали У8 $T_d = 505$ К.

Рассмотрим влияние обрабатываемых материалов с различными свойствами на концентрацию $N(S, \tau)_{дм}$ диффундирующих атомов при свободном точении заготовок инструментом, оснащенным твердым сплавом Т15К6 при значениях углов $\gamma=0$ и $\phi=45^\circ$ без учета износа задней поверхности, со скоростью $v=1$ м/с, подачей $S=0,49$ мм/об и глубиной резания $t=0,4$ мм.

Значения относительных коэффициентов отвода теплоты b^* в стружку определяют по формуле (52), тогда

$$b^* = \frac{1}{1 + 0,177 * \eta \sqrt{\frac{\omega}{\sqrt{\eta^2 + 1}}}} \quad (80)$$

При обработке различных материалов значения коэффициентов усадки стружки η , относительных коэффициентов отвода теплоты b^* , сил резания будут различными. Рассмотрим диффузию углерода в ряде сталей при постоянных режимах резания. Так при обработке сталей со скоростью

$\vartheta=1\text{м/с}$, подачей $S=0,49\text{мм/об}$, глубиной резания $t=4\text{мм}$ выражение (73)

принимает вид

$$\frac{N(0,49; \tau)_{\text{дм}}}{N_0} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2,3}{\sqrt{\eta}} * D_0 \exp \left[\frac{4,3(P_z * \eta - P_N) * b^*}{\eta \left[273 + \frac{1,19 * \omega * b^*}{\lambda \sqrt{\eta^2 + 1}} (P_z \eta - P_N) \right]} \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (81)$$

Расчетные, экспериментальные значения переменных и справочные коэффициенты, а также значения относительной концентрации $N(S, \tau)_{\text{дм}}/N_0$ представлены в таблице 3.

Таблица 3- Расчетные и экспериментальные данные для определения концентрации $N(S, \tau)_{\text{дм}}$ диффундирующих атомов углерода

Обрабат. материал	σ_B , кг/мм ²	НВ	b^*	η	P_z , кг	P_N , кг	ω , см ² /с	λ , кал/с*см*град	$N(S, \tau)_{\text{дм}}/N_0$
Сталь 10	38	97	0,90	5,0	333	106	0,078	0,094	0,74
Сталь 20	44	126	0,93	2,8	340	136	0,077	0,095	0,67
Сталь 20х	47	134	0,92	3,0	351	150	0,074	0,086	0,66
Сталь 40	59	179	0,93	2,45	365	224	0,076	0,092	0,62
Сталь 45	61	180	0,93	2,3	375	244	0,080	0,096	0,61
Сталь 50	65	191	0,93	2,1	398	288	0,082	0,098	0,60
У8	80	210	0,94	1,8	515	438	0,075	0,086	0,56
08х18н10т	53	165	0,95	1,95	363	203	0,050	0,054	0,56

Как следует из таблицы 3, на диффузию примесных атомов в значительной степени оказывает влияние усадки стружки, т.е. при больших значениях коэффициента усадки η концентрация диффундирующих атомов

возрастает. Такие показатели как предел прочности σ_B или твердость материала HV обрабатываемой заготовки (для сравнения сталь 40 и сталь 08X18H10T) практически не оказывают влияния на процесс диффузии.

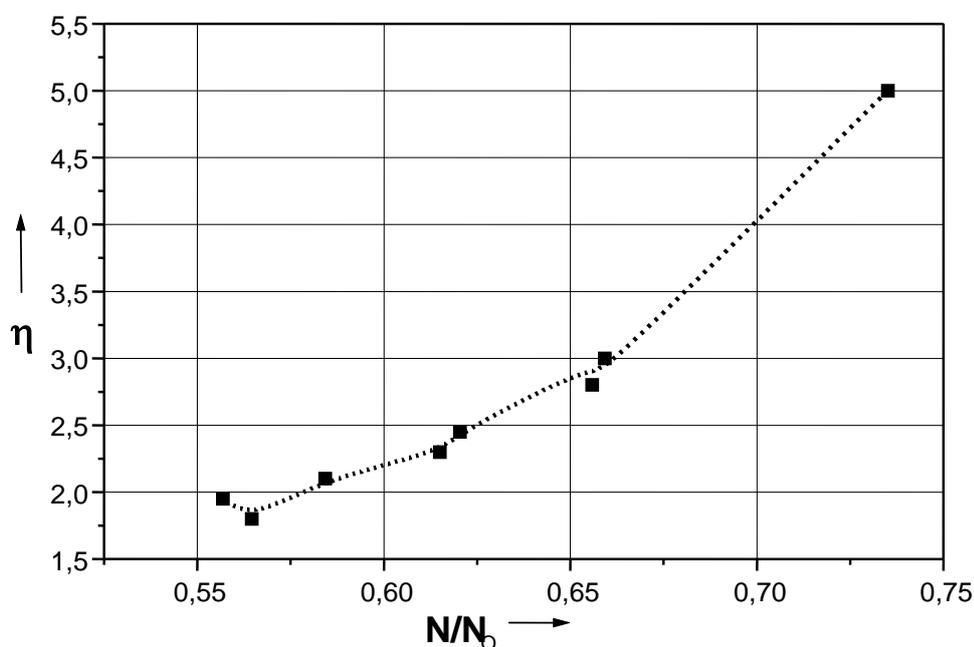


Рисунок 4 - Зависимость концентрации диффундирующих атомов углерода от усадки стружки

На рисунке 4 представлена зависимость применения относительной концентрации $N(S, \tau)_{\text{дм}}$ диффундирующих примесей углерода от усадки стружки при тчении различных материалов.

Представленная на рисунке 4 зависимость подтверждает известные положения, что при более высоких пластических деформациях срезаемого слоя металла, диффузионные процессы протекают интенсивнее и концентрация диффундирующего вещества возрастает.

Сила резания при малых значениях переднего угла γ более чем при больших. Для того чтобы определить насколько изменится процесс диффузии примесных атомов, рассмотрим процесс тчения стали 45

твердосплавным инструментом Т15К6 со скоростью резания $\mathfrak{V}=1\text{м/с}=60\text{м/мин}$, подачей $S=0,49\text{мм/об}$ и глубиной резания $t=4\text{мм}$.

Значения относительных коэффициентов отвода тепла b^* в стружку определяемую в соответствии с формулой (52), которая для стали 45 и приведенных выше режимов резания имеет вид

$$b^* = \frac{1}{1 + 0,05 * \eta \sqrt{\frac{\cos \gamma}{\sqrt{\eta^2 - 2\eta \sin \gamma + 1}}}}. \quad (82)$$

Выражение для определения концентрации диффундирующих примесей в деформируемой кристаллической решетке обрабатываемого материала стали 45 при отсутствии износа режущего инструмента в соответствии с (72) выглядит следующим образом

$$\frac{N(s, \tau)_{\text{дг}}}{N_0} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2,3}{\sqrt{\eta}} \left[D_0 \exp \left(\frac{4,3(P_z(\eta - \sin \gamma) - P_N \cos \gamma) * b^*}{\eta \left[273 + \frac{b^* \cos \gamma}{\sqrt{\eta^2 - 2\eta \sin \gamma + 1}} (P_z(\eta - \sin \gamma) - P_N \cos \gamma) \right]} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (83)$$

Значения составляющих силы резания P_Z и P_N определяют при расчетах в соответствии с формулами (7), (12) и (13) с учетом коэффициента K_γ , определяющего величину угла γ .

Полученные данные коэффициента усадки стружки η на выбранных режимах точения стали 45, расчетные значения коэффициента b^* и составляющие силы резания P_Z и P_N , необходимые для определения концентрации диффундирующих атомов углерода при различных значениях переднего угла γ инструмента представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Расчетные и экспериментальные данные для определения относительной концентрации $N(S, \tau) D\gamma/N_0$ диффундирующих атомов углерода в стали 45 при точении

Угол γ , град	η	b^*	P_Z , кг	P_N , кг	$N(S, \tau) D\gamma/N_0$
-20	1,82	0,95	469	305	0,70
-15	1,96	0,95	450	293	0,68
-10	2,09	0,93	431	281	0,65
-5	2,2	0,93	394	256	0,62
0	2,3	0,93	375	244	0,61
+5	2,38	0,93	356	232	0,59
+10	2,44	0,93	319	207	0,56
+15	2,48	0,93	300	195	0,54
+20	2,5	0,93	281	183	0,51

При увеличении составляющих силы резания P_Z и P_N концентрация диффундирующих атомов углерода возрастает при уменьшении коэффициента усадки стружки η . Наиболее наглядно данная зависимость представлена на рисунке 5.

Как следует из рисунка 5 зависимость концентрации диффундирующих атомов углерода от значений переднего угла γ носит примерно прямолинейный характер, подобный зависимости силы от значений угла γ [49].

Рассмотрим при тех же режимах обработки стали 45 процесс диффузии атомов углерода в зависимости от значений главного угла в плане φ . При $\eta=2.3$ выражение (52) имеет вид

$$b^* = \frac{1}{1 + 0,086\sqrt{\sin \varphi}} \quad (84)$$

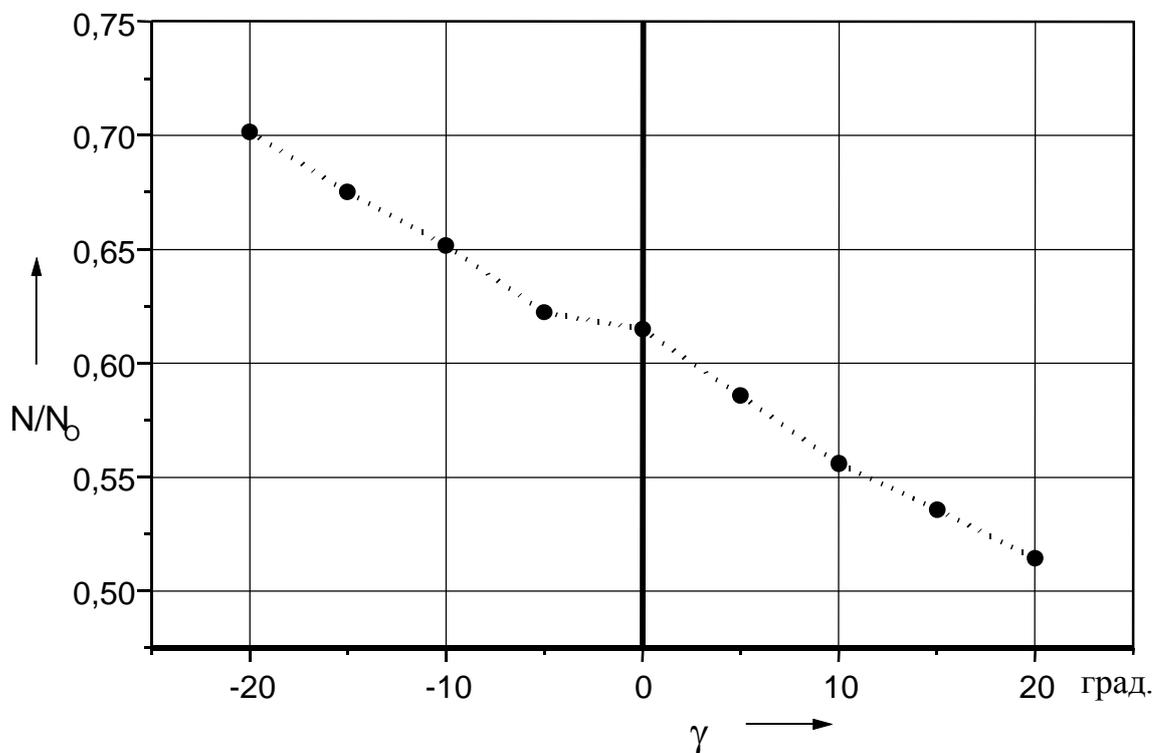


Рисунок 5 – Зависимость концентрации диффундирующих атомов углерода от значений переднего угла γ

Тогда выражение (73) выглядит следующим образом

$$\frac{N(s, \tau)_{д\varphi}}{N_0} = \operatorname{erfc} \left\{ 2,5 \sqrt{\sin^3 \varphi} \left[D_0 \exp \left(\frac{4,7 * b^*}{1,11 + b^*} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \right\}. \quad (85)$$

Изменение величины главного угла в плане φ оказывает влияние на относительный коэффициент отвода тепла b^* в стружку, когда при его увеличении ширина среза v возрастает. В таблице 5 представлены расчетные значения концентрации диффундирующих атомов углерода при постоянных режимах резания и различных значениях угла φ .

Таблица 5- Значения относительной концентрации $N(S, \tau)D\varphi/N_0$ диффундирующих атомов углерода при различных значениях угла φ и постоянных режимах точения стали 45

Угол φ , град	Ширина среза v , <i>мм</i>	b^*	$N(S, \tau)D\varphi/N_0$
30	0,245	0,94	0,76
45	0,346	0,93	0,61
60	0,424	0,925	0,49
75	0,473	0,92	0,41
90	0,49	0,92	0,39

Графическая зависимость относительной концентрации $N(S, \tau)D\varphi/N_0$ диффундирующих атомов углерода в стали 45 от величины главного угла в плане φ представлена на рисунке 5.

При незначительном уменьшении коэффициента b^* с увеличением угла φ относительная концентрация диффундирующих атомов углерода снижается, что является следствием увеличения ширины срезаемого слоя, а значит и ширины слоя диффузии.

Таким образом, изменение геометрических параметров режущего инструмента, таких как главный угол в плане φ и передний угол γ , оказывает влияние на изменение сил резания, а соответственно - процессы диффузии в стружке в течение периода действия внешних сил.

Износ режущего инструмента приводит к увеличению средней температуры в зоне резания, а, следовательно, к возрастанию тепловой энергии, распределенной в стружке, значение которой определяют в соответствии с выражением (58).

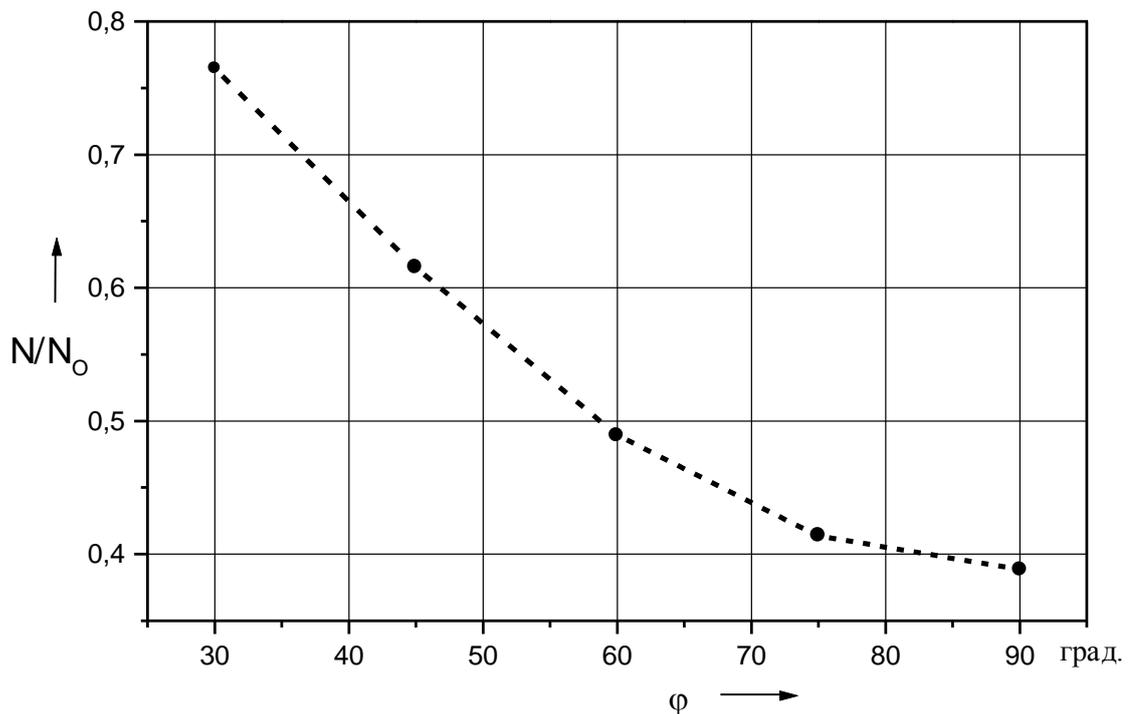


Рисунок 6 - Зависимость относительной концентрации диффундирующего в стали 45 углерода от значений угла φ

Расчет температуры в этом случае производят в соответствии с формулой, которая при учете износа задней поверхности режущего инструмента выглядит следующим образом

$$T_{\text{ди}} = 273 + \frac{2,34 * \omega * b^* * \cos \gamma}{\lambda * S * t \sqrt{\eta^2 - 2\eta \sin \gamma + 1}} [(P_z + F_{\text{тз}})(\eta - \sin \gamma) - (P_N - N_3) \cos \gamma] \quad (86)$$

Отсюда математическое выражение (72) для определения относительной концентрации $N(S, \tau)_{\text{ди}}/N_0$ примесных атомов при деформировании кристаллической решетки обрабатываемого материала и превращении его в стружку при износе задней поверхности режущего инструмента и значениях переднего угла $\gamma=0$ принимает вид

$$\frac{N(s, \tau)_{\text{ди}}}{N_o} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{2S\sqrt{v} \cdot \sin^3 \varphi}{\sqrt{t} \cdot \eta} \left[D_o \exp \left(\frac{8,45 \cdot b^* (\eta(P_z + F_{T3}) - (P_N + N_3))}{\operatorname{St} \eta \left[273 + \frac{2,34 \cdot \omega \cdot b^*}{\lambda \cdot \operatorname{St} \sqrt{\eta^2 + 1}} (\eta(P_z + F_{T3}) - (P_N + N_3)) \right]} \right) \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (87)$$

При обработке стали 45 твердосплавным инструментом T15K6 с геометрическими параметрами $\varphi=45^\circ$ и $\gamma=0$ со скоростью резания $\vartheta=1\text{ м/с}=60\text{ м/мин}$, подачей $S=0,49\text{ мм/об}$, глубиной резания $t=4\text{ мм}$ при $\eta=2,3$ в зависимости от износа задней поверхности режущего инструмента выражение (87) выглядит следующим образом в упрощенном виде

$$\frac{N(0,49; \tau)_{\text{ди}}}{N_o} = \operatorname{erfc} \left(\frac{1,05}{\sqrt{\exp \left(\frac{422,7 + 4,47 \xi_3}{196,5 + \xi_3} \right)}} \right) \quad (88)$$

При соответствующих режимах обработки стали 45 в таблице 6 представлены значения относительной концентрации $N(S, \tau)_{\text{ди}}/N_o$ диффундирующих атомов углерода при различной степени износа режущего инструмента.

Таблица 6 - Изменение концентрации диффундирующих атомов углерода при износе задней грани инструмента

Длина конт.	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0
ξ_3 , мм										
$N(S, \tau)_{\text{ди}}/N_o$	0,615	0,615	0,615	0,616	0,616	0,617	0,617	0,618	0,618	0,619

Как следует из таблицы 6 при износе задней поверхности режущего инструмента концентрация диффундирующих примесей возрастает незначительно.

Это объясняется тем, что тепловой поток из зоны контакта инструмента с заготовкой, направленный в деформируемую стружку в течение периода действия внешних сил, оказывает незначительное воздействие на процессы диффузии и распределение тепла в стружку при резании через обрабатываемую заготовку. Поэтому можно предположить, что основная часть теплового потока, распределяемого из зоны контакта инструмента с заготовкой в стружку, будет направлена в стружку через режущий инструмент, увеличивая температуру в зоне контакта стружки с инструментом. Это и будет определять изменение характера процессов диффузии, проходящих при трении инструмента и стружки.

Влияние скорости резания на силу резания носит неоднозначный характер, поэтому и ее влияние на диффузионные процессы, проходящие при формировании стружки должны проходить с учетом изменения сил резания.

В соответствии с выражением (52) отвод тепла в стружку будет зависеть от скорости резания \mathfrak{V} и коэффициента усадки стружки η , который определяется коэффициентом b^* , определяемым по формуле

$$b^* = \frac{1}{1 + \frac{0,388\eta}{\sqrt{v\sqrt{\eta^2 + 1}}}}. \quad (89)$$

При значениях угла $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0$ и отсутствии износа режущего инструмента для определения концентрации диффундирующих атомов в стружке в течение периода действия внешних сил при обработке стали 45 с различными значениями скорости резания \mathfrak{V} , подачей $S=0,49$ мм/об и глубиной резания $t=4$ мм расчетная формула в соответствии с (77) выглядит следующим образом

$$\frac{N(s, \tau)_{д\upsilon}}{N_0} = \operatorname{erfc} \left\{ \frac{0,29\sqrt{v}}{\sqrt{\eta}} \left[D_0 \exp \left(\frac{(1616,7\eta - 1052)b^*}{\eta \left[273 + \frac{(373\eta - 2242,8)b^*}{\sqrt{\eta^2 + 1}} \right]} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. (90)$$

Подставляя в выражение (90) различные значения скоростей резания ϑ и полученные опытным путем соответствующие им коэффициенты усадки стружки для стали 45, обрабатываемой твердосплавным инструментом на выбранных режимах, определяют концентрацию диффундирующих атомов углерода. Расчетные и экспериментальные данные представлены в таблице 7.

Снижение концентрации диффундирующих примесей в стружке в течение периода действия внешних сил связано с увеличением скорости резания ϑ , что показывают расчеты, приведенные в таблице 7. Это объясняется уменьшением времени диффузии.

Таблица 7 - Расчетные и экспериментальные данные для определения относительно концентрации $N(S, \tau)_{д\vartheta}/N_0$ диффундирующих атомов углерода при различных скоростях резания

Скорость резания ϑ , м/с (м/мин)	Коэффициент усадки, η	Коэффициент отвода тепла, b^*	$N(S, \tau)_{д\vartheta}/N_0$
0,33 (20)	1,85	0,95	0,73
0,67 (40)	2,4	0,94	0,68
1,0 (60)	2,3	0,93	0,61
1,33 (80)	2,2	0,94	0,55
1,67 (100)	2,1	0,95	0,49
2,0 (120)	2,0	0,955	0,44
2,5 (150)	1,9	0,96	0,37
3,33 (200)	1,85	0,97	0,29

Несмотря на то, что усадка стружки при различных скоростях резания изменяется неравномерно, диффузия примесей при низких скоростях проходит дольше, чем при высоких.

Более наглядно зависимость концентрации диффундирующих атомов углерода от различных скоростей резания представлена на рисунке 2.23.

Как следует из рисунка 7 зависимости коэффициента усадки стружки η и относительной концентрации $N(N_0, \tau)D_0/N_0$ диффундирующих атомов углерода носят схожий характер. При скоростях резания свыше 0,67 м/с происходит снижение их значений, что однозначно определяет функциональную связь между усадкой стружки и диффузией.

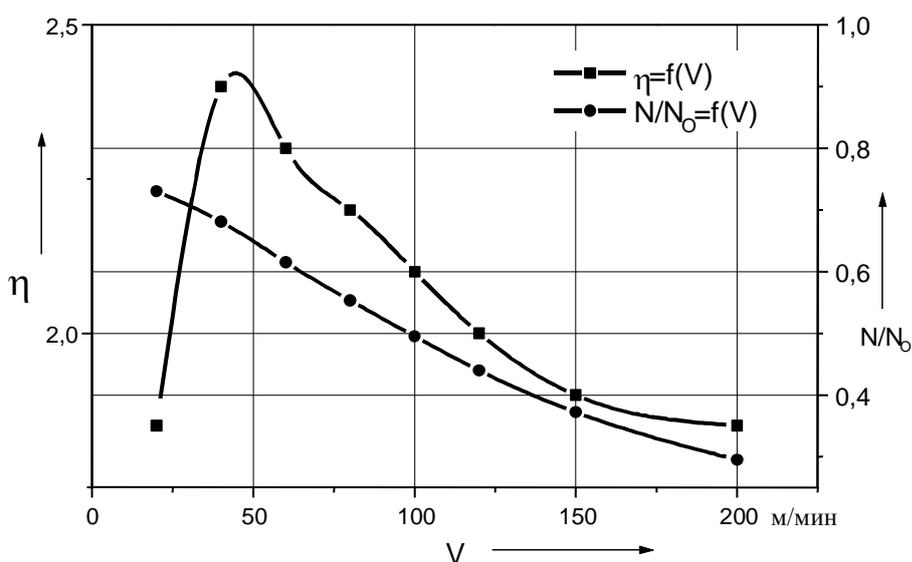


Рисунок 7 - Зависимость усадки стружки и диффузии углерода в стали 45 от скорости резания

Материал режущего инструмента оказывает влияние на изменение температуры трения и силы резания вследствие его физико-механических свойств и химического состава (температуропроводность, коэффициент трения, содержание карбидов титана и кобальта и т.д.) [73].

Свойства материала режущей части инструмента на силы резания влияют в том же направлении, как и на усадку стружки η , а именно: силы

резания уменьшаются по мере увеличения в сплаве карбидов титана [66]. Более резко изменяются при этом силы, расположенные в основной плоскости (радиальная сила P_Y) и менее резко силы, расположенные в плоскости резания (тангенциальная сила P_Z).

Кроме этого, по мере увеличения в сплаве инструментального материала карбидов титана приводит к некоторому снижению средней температуры в зоне контакта инструмента со стружкой.

Режущие инструменты с большим содержанием карбидов титана в силу малой теплопроводности работают при более высокой температуре, что способствует снижению трения между трущимися поверхностями, и тем самым уменьшению силы резания [66]. По этой же причине на передней поверхности твердосплавного резца коэффициент трения возрастает с увеличением в сплаве кобальта.

По мере увеличения скорости резания \mathfrak{V} длина контакта $\xi_{п}$ стружки с передней поверхностью инструмента уменьшается. Причем значения $\xi_{п}$ уменьшаются по мере увеличения в инструментальном сплаве карбидов титана. Это также связано с трением контактирующих поверхностей.

При деформировании срезаемого слоя и превращении его в стружку температура последней зависит от значений относительного коэффициента отвода теплоты b^* , определяемому в условиях обработки одного материала различными инструментами с одинаковыми геометрическими параметрами по формуле (88).

На примере обработки стали 45 с подачей $S=0,49$ мм/об и глубиной резания $t=4$ мм при различных скоростях резания \mathfrak{V} , рассмотрим влияние инструментального материала с разным химическим составом и физико-механическими свойствами на усадку стружки η и длину контакта $\xi_{п}$ передней поверхности инструмента со стружкой. В таблице 8 представлены экспериментальные данные значений η и $\xi_{п}$, и расчетные значения b^* , получаемые при обработке стали 45 различными по составу инструментами с

передним углом резания $\gamma=0$ и главным углом в плане $\varphi=45^\circ$ при разных скоростях резания ϑ , и прочих равных условиях.

Таблица 8 – Расчетные и экспериментальные значения η , ξ_n и b^* при обработке стали 45 инструментами с различными свойствами, на различных скоростях резания: $S = 0,49$ мм/об, $t = 4$ мм, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 0$

Скорость резания ϑ , м/с	Материал инструмента											
	BK8			T5K10			T15K6			T30K4		
	η	b^*	ξ_n , мм	η	b^*	ξ_n , мм	η	b^*	ξ_n , мм	η	b^*	ξ_n , мм
0,33	2,0	0,90	2,4	1,9	0,90	2,3	1,85	0,95	2,2	1,8	0,90	2,2
0,67	2,7	0,91	2,3	2,55	0,91	2,2	2,4	0,94	2,1	2,3	0,92	2,1
1,0	2,6	0,93	2,1	2,45	0,93	2,0	2,3	0,93	2,0	2,25	0,93	1,9
1,33	2,45	0,94	2,0	2,3	0,94	1,9	2,2	0,94	1,85	2,1	0,94	1,75
1,67	2,25	0,95	1,9	2,15	0,95	1,8	2,1	0,95	1,6	2,05	0,95	1,5
2,0	2,2	0,95	1,7	2,05	0,95	1,6	2,0	0,95	1,5	1,95	0,96	1,4
2,5	2,0	0,96	1,5	1,95	0,96	1,5	1,9	0,96	1,4	1,85	0,96	1,35
3,33	1,9	0,96	1,4	1,9	0,97	1,35	1,85	0,97	1,3	1,8	0,97	1,25

В различных формулах при определении сил резания обычно не учитывают материал режущей части инструмента, который, однако, оказывает (влияние) на процесс резания. Как следует из таблицы 8 при различных скоростях резания, отличающимися по своему составу и физико-механическим свойствам, инструментами, экспериментальные значения усадки стружки и длины контакта ее с передней поверхностью резца будут различными. Поэтому и диффузионные процессы будут отличаться по своему характеру.

В соответствии с данными, представленными в таблице 8 и выражением (90) рассмотрим диффузию в стружке в течение периода действия внешних сил при обработке стали 45 инструментами из различного материала.

Полученные значения концентрации диффундирующих атомов углерода при различных скоростях резания, инструментами из металлокерамики и минералокерамики с прочими равными условиями представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Расчетных значений относительной концентрации диффундирующих атомов углерода при точении различными инструментами на разных скоростях резания.

Скорость резания v , м/с	Материал инструмента				
	ВК8	T15K10	T15K6	T30K4	ЦМ322
0,33	0,74	0,74	0,73	0,73	0,71
0,67	0,70	0,70	0,68	0,68	0,65
1,0	0,64	0,63	0,61	0,61	0,59
1,33	0,57	0,56	0,55	0,54	0,51
1,67	0,51	0,50	0,49	0,49	0,45
2,0	0,47	0,45	0,44	0,43	0,41
2,5	0,39	0,38	0,37	0,36	0,32
3,33	0,30	0,30	0,29	0,28	0,22

Как следует из таблицы 9 при обработке металлов инструментами с пластинами из различных материалов изменяется коэффициент усадки стружки, длина контакта ее с передней поверхностью инструмента, а также концентрация диффундирующих примесей в стружке в течение периода действия сил.

Таким образом, проведенные исследования влияния сил резания на диффузионные процессы при обработке ряда сталей инструментами с различными геометрическими параметрами, химическим составом и физико-механическими свойствами, а также степенью износа задней поверхности, показали, что основными факторами, влияющими на концентрацию

$N(s, \tau)$ диффундирующих атомов в стружке в течение периода действия внешних сил являются:

- размеры сечения срезаемого слоя;
- геометрические параметры режущего инструмента, основными из которых являются передний угол γ и главный угол φ ;
- материал режущего инструмента;
- материал обрабатываемой заготовки;
- режимы резания.

Усадка стружки и относительный отвод теплоты являются вторичными факторами, зависящими от материала инструмента и обрабатываемой заготовки, скорости резания, размеров сечения срезаемого слоя и геометрии режущего инструмента, которые влияют на процесс диффузии в формируемых объемах стружки.

Диффузия при деформировании срезаемого слоя и контакте инструмента с обрабатываемой заготовкой и стружкой.

Трение инструмента с контактирующими поверхностями обрабатываемого материала и стружки, сопровождается деформированием прирезцовых слоев. При стружкообразовании после деформации кристаллической решетки при действии сил трения кроме формирования температурных полей прирезцовые слои стружки деформируются вплоть до выхода ее из зоны контакта с передней поверхностью инструмента. Как и степень деформации слоев сечения стружки, так и температура, развивающаяся в них и распространяющаяся в соответствии с законами теплопроводности, будут различными.

На относительно малых расстояниях, соизмеримых с длиной контакта инструмента со стружкой, при формализованном подходе можно считать, что температура в зоне контакта и в продольных слоях стружки, ограниченной глубиной проникновения теплоты трения Δ на длине контакта ξ_n , будет

одинаковой. В этом случае принимают, что значение тепловой энергии трения E_T не зависит от глубины проникновения теплоты трения $\Delta (\xi_n)$.

В соответствии с выражениями (30) и (46) тепловая энергия трения $E_{ТП}$ и $E_{ТЗ}$, распределенная соответственно в стружку и заготовку, значительно превышает энергию деформирования E_d . Отсюда концентрация диффундирующих примесей при деформации прирезцовых слоев металла и трении контактирующих поверхностей будет равной концентрации примесей в материале в состоянии поставки, т.е. $N_T = N_0$.

После выхода из зоны контакта стружки и заготовки с инструментом, объем, в котором протекает диффузия будет определяться глубиной проникновения теплоты трения $\Delta (\xi_z)$ и $\Delta (\xi_n)$ на длине контакта ξ_z и ξ_n , а также шириной среза v (подачей S).

Отсюда интенсивность диффузии примесей из материала определяется скоростью формирования этих объемов:

$$J_{ТЗ} = v * v * \Delta_z ; \quad (91)$$

$$J_{ТП} = \frac{v}{\eta} * v * \Delta_n . \quad (92)$$

В соответствии с выражениями (2.42) и (2.68) и учетом размерности, используемых в формуле величин, имеем

$$J_{ТЗ} = 5,39 * S * \sin \varphi \sqrt{\omega * \xi_z * v} , \quad (94)$$

$$J_{ТП} = 5,39 * S * \sin \varphi \sqrt{\omega * \eta * \xi_n * v} . \quad (95)$$

Таким образом, интенсивность диффузии трения в соответствии с принятыми допущениями будет зависеть от скорости резания, длины контакта и усадки стружки.

Процесс диффузии при трении инструмента с заготовкой и стружкой происходит одновременно, тогда суммарная интенсивность диффузии J_t примесных атомов определяют по формуле

$$J_T = 5,39 * S * \sin \varphi \sqrt{\omega * v} (\sqrt{\xi_3} + \sqrt{\xi_{II} \eta}) \quad (96)$$

В качестве примера рассмотрим диффузию атомов углерода при точении стали 45 инструментом с пластинами из твердого сплава Т15К6 на различных скоростях резания ϑ и разной степенью износа задней поверхности инструмента.

При условии, что в стали 45 содержание углерода составляет около 0,45%, то выражение (2.133) окончательно принимает вид

$$J_T = 5,39 * k * S * \sin \varphi \sqrt{\omega * v} (\sqrt{\xi_3} + \sqrt{\xi_{II} \eta}), \quad (97)$$

где k - коэффициент, учитывающий процентное содержание примесей в обрабатываемом материале.

Принимая для стали 45 $k = 0,0045$ можно определить интенсивность диффундирующих атомов углерода при трении инструмента с обрабатываемой заготовкой и стружкой.

Процессы диффузии протекают в течение максимального действия внешних сил, то есть в период контакта инструмента со стружкой, ограниченного глубиной срезаемого слоя a . В соответствии с этим принимаем при расчетах $a = \xi_{II}$.

При деформировании срезаемого слоя интенсивность диффузии J_D определяется концентрацией диффундирующих примесей в объеме стружки, в которой не распространяется теплота трения при контакте инструмента с передней поверхностью режущего инструмента, т.е.

$$J_D = k v s \cdot \sin \varphi \frac{1000 N(s, \tau)_D}{60 N_O \eta} \left(\frac{a_1 - \Delta(\xi_{II})}{a_1} \right), \quad (98)$$

где a_1 - высота сечения стружки.

Так как

$$a_1 = a * \eta = \frac{t * \eta}{\sin \varphi}, \quad (99)$$

а глубина проникновения теплоты трения $\Delta (\xi_n)$ при контакте инструмента со стружкой определяется по формуле (44) то выражение (98) имеет вид

$$J_{\text{д}} = 16,67kvs \cdot \sin \varphi \frac{N(s, \tau)_{\text{д}}}{N_0 \eta} \left(\frac{t \eta}{\sin \varphi} - 5,39 \sqrt{\frac{\omega * \eta * t}{v * \sin \varphi}} \right). \quad (100)$$

При резании металлов в течение периода действия внешних сил происходит диффузия примесных атомов при трении контактируемых поверхностей и деформировании срезаемого слоя изпри поверхностных слоев обработанной поверхности изделия и стружки. Общая интенсивность диффузии примесей J_0 определяется суммой $J_{\text{д}}$, $J_{\text{тп}}$ и $J_{\text{тз}}$. Тогда в соответствии с (97) и (99) имеем

$$J_0 = 16,67kvs \sin \varphi \frac{N(s, \tau)_{\text{д}}}{N_0 \eta} \left[\frac{t \eta N}{N_0 \sin \varphi} + 5,39 \left(1 - \frac{N}{N_0} \right) \sqrt{\frac{\omega}{v}} \left(\sqrt{\frac{t \eta}{\sin \varphi}} + \eta \sqrt{\xi_3} \right) \right]. \quad (101)$$

Полученное математическое выражение (100) позволяет определить суммарную интенсивность диффузии J_0 примесных атомов при точении металлов с учетом износа режущего инструмента и соответствующими его геометрическими параметрами на любых режимах обработки.

Моделирование процесса усадки стружки при различных значениях скорости резания.

Полученные математические выражения позволяют исследовать влияние скорости резания ϑ на усадку стружки. Как показывают экспериментальные данные, при увеличении скорости резания ϑ

коэффициент усадки стружки η возрастает, затем, начиная с некоторого значения скорости (в зависимости от величины подачи), уменьшается.

При исследовании диффузии примесных частиц в снимаемой стружке теоретически получена зависимость изменения относительной концентрации N/N_0 от скорости резания [164]

$$\frac{N}{N_0} = \text{th} \frac{1}{(y\nu + z)^2}, \quad (102)$$

где y и z – поправочные коэффициенты.

При этом коэффициент $y = 10^{-3} \dots 10^{-4}$ мин/м, а $z = 0,7 \dots 0,9$.

Графически зависимость относительной концентрации N/N_0 диффундирующих примесей от скорости резания \mathfrak{V} представлена на рисунке 8.

На изменение величины N/N_0 оказывает влияние, как скорость резания \mathfrak{V} , так и усадка стружки при прочих постоянных условиях обработки металлов.

С одной стороны

$$\frac{N}{N_0} = \text{erfc} \frac{2,04 * S * \sqrt{\nu * \sin^3 \varphi}}{\sqrt{t * \eta * D}} \quad (103)$$

а с другой стороны в упрощенной форме

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \sqrt{1 - \exp(-1,26U^2)}, \quad (104)$$

где

$$1,26U^2 = \frac{5,25 * S^2 * \nu * \sin^3 \varphi}{t * \eta * D}. \quad (105)$$

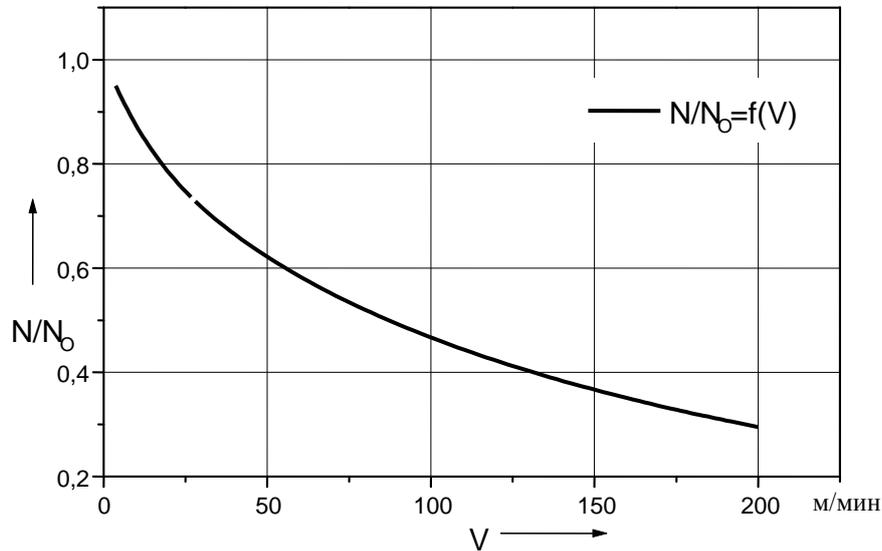


Рисунок 8 – Изменение относительной концентрации N/N_0 от скорости резания ϑ

В соответствии с выражением (87) коэффициент диффузии при различных скоростях резания и прочих равных условиях изменяется в пределах 10...15%, что не оказывает существенного влияния на величину N/N_0 .

Произведем замену переменной

$$\frac{5,25 * S^2 * \sin^3 \varphi}{t * D} = X, \quad (105)$$

где $X = \text{const}$ – поправочный коэффициент.

В соответствии с уравнениями (101) и (107) выражение (104) принимает вид.

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{vX}{\eta}\right)}. \quad (106)$$

Приравняв два выражения (2.139) и (2.144), получим

$$\eta = -\frac{vX}{\ln\left[1 - \left(1 - \operatorname{th}\frac{1}{(yV + z)^2}\right)^2\right]}. \quad (107)$$

Полученное математическое выражение (107) позволяет теоретически определить значения коэффициента усадки стружки η при различных скоростях резания \mathfrak{S} . При формализованном подходе, принимая условно коэффициент диффузии, например, $D=20$ мм²/с, можно определить не столько действительные значения коэффициента усадки стружки η , сколько характер его изменения на всем диапазоне скоростей.

Кроме этого, коэффициенты пропорциональности X и Y имеют значения одного порядка и незначительно отличаются, поэтому принимаем $x=y$, определяемые по формуле(107) и $Z \approx \sqrt[6]{S}$.

В таблице 10 приведены значения коэффициента диффузии D и поправочных коэффициентов X, Y и Z при точении стали 45.

Подставляя полученные значения x, y , и z в выражения (107), определяют величину η при различных скоростях резания \mathfrak{S} .

Таблица 10 –Значения поправочных коэффициентов для определения коэффициента усадки стружки η при $t=4$ мм

Подача S , мм/об	D , мм ² /с	X	Y , мин/м	Z
0,125	24,0	$3 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$	0,76
0,2	21,4	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	0,84
0,35	18,9	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,88

0,49	17,2	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,90
------	------	---------------------	---------------------	------

В таблице 11 представлены значения коэффициента усадки стружки η , полученные в ходе эксперимента и расчетным путем с использованием математического выражения (107). Данные получены при точении стали 45 с различными скоростями резания и глубине $t=4\text{мм}$.

Таблица 11 – Расчетные и экспериментальные значения коэффициента усадки стружки ($\eta_{\text{экс.}} / \eta_{\text{расч}}$)

S, мм/об	Скорость резания V, м/с							
	0,33	0,67	1,0	1,33	1,67	2,0	2,5	3,33
0,125	1,75	1,8	1,9	2,3	2,4	2,45	2,35	2,2
	1,24	1,92	2,27	2,42	2,45	2,42	2,29	2,03
0,2	1,7	1,85	2,15	2,3	2,35	2,3	2,15	2,0
	1,11	1,8	2,23	2,47	2,6	2,66	2,65	2,55
0,35	2,1	2,35	2,4	2,3	2,2	2,1	2,05	1,9
	1,82	2,38	2,5	2,46	2,36	2,25	2,1	1,92
0,49	1,85	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,85
	2,28	2,46	2,35	2,23	2,1	2,0	1,89	1,8

Как следует из таблицы 11 расхождение экспериментальных значений коэффициента усадки $\eta_{\text{экс.}}$ стружки с расчетными $\eta_{\text{расч.}}$ составляет не более 10% на скоростях свыше 0,67 м/с. При скоростях около 20 м/мин расхождение $\eta_{\text{экс.}}$ и $\eta_{\text{расч.}}$ составляет около 50%. Обычно точение осуществляется на скоростях более 0,67 м/с, поэтому это расхождение не отражает характер изменения величины η от скоростей резания ϑ , и может не учитываться на практике.

Таким образом, исследования диффузионных процессов при резании металлов позволили получить математическую модель, представленную выражением (107), изменения коэффициента усадки стружки η от скорости

резания ϑ . Данная модель позволяет определить величину η для различных значений подачи и скоростей резания. Глубина резания t незначительно оказывает влияние на изменение усадки стружки. Таким образом, в расчетах коэффициента усадки стружки η для различных скоростей резания ϑ и подач S принимаем $t = \text{const}$.

В ы в о д ы

1. Проведен анализ механо–физико-химических изменений в системе ЗИССо при механической обработке. Рассмотрены миграционные процессы примесных частиц в снимаемой стружке в течение действия внешних сил.

2. Исследованы процессы образования диффундирующими примесями металла газообразных летучих соединений в зоне резания и выявлены источники формирования газовой среды в зоне обработки при химическом взаимодействии кислорода и азота воздуха.

3. Разработаны и схематизировано представлены физические модели преобразования энергии и вещества, распределения тепловой энергии в системе ЗИССо, связь факторов и процессов при резании металлов, образование диффундирующими примесями летучих соединений при взаимодействии с атмосферным кислородом.

4. В основу физических моделей термомеханических изменений в пластически–деформируемом и разрушаемом материале при резании заложено сочетание последовательного и параллельного взаимодействия факторов, имеющих механическую, механохимическую, химическую и сорбционную природу, определяющих многообразие и аномальность (износ, температура, неоднородность материала и т.д.) процессов механической обработки.

5. Установленные закономерности теплового распределения и тепловой энергии при различных условиях резания, представленные в виде математических выражений, позволяют произвести оценку и рассчитать

температуру и тепловую энергию в объеме срезаемого слоя, обрабатываемого металла.

6. На основе расчетов теоретически обоснованна гипотеза о значительных значениях тепловой энергии, выделяемой при трении инструмента со стружкой и заготовкой, превышающей энергию деформирования срезаемого слоя.

7. На основании известных математических выражений получены новые, устанавливающие зависимость изменения тепловой энергии от параметров резания, в том числе от износа режущего инструмента. По результатам исследований и полученных для процессов резания математических выражений устанавливается однозначная связь изменения сил резания с тепловой энергией, выделяемой при механической обработке.

8. Увеличение сил резания повышает интенсивность диффузионных процессов и концентрацию образованных примесями обрабатываемого металла летучих соединений. Повышение подачи снижает концентрацию диффундирующих примесей к зоне раздела фаз и концентрацию образованных в зоне обработки газов, что связано с ростом ширины среза, увеличивающей длину пробега частиц в течение периода действия сил. С ростом глубины срезаемого слоя концентрация газов, образованных в зоне обработки, возрастает, что определяется периодом действия сил пластического деформирования при формировании стружки. Повышение твердости металла, связанного с пределом прочности, уменьшает концентрацию образованных соединений и примесей с атмосферным кислородом вследствие более прочных связей, чем у относительно мягких металлов. При увеличении величины переднего угла режущего инструмента концентрация образованных в зоне обработки газов снижается вследствие уменьшения сил резания и повышения обрабатываемости материала. При больших значениях главного угла в плане концентрация образованных летучих соединений снижается вследствие увеличения длины пробега частиц из-за возрастания ширины срезаемого слоя.

9. Увеличение скорости приводит к снижению концентрации образованных газов в зоне обработки из-за уменьшения времени действия сил резания при контакте инструмента с обрабатываемым материалом.

10. Режущие инструменты с повышенным содержанием карбида титана имеют меньший коэффициент трения с обрабатываемой заготовкой. В этом случае, коэффициент трения оказывает влияние на длину контакта и усадку стружки, что отражается на периоде действия внешних сил при прочих равных условиях резания.

11. С ростом износа режущего инструмента повышается длина контактного с заготовкой и средняя температура в зоне резания, что приводит к повышению интенсивности диффузии примесных частиц. Отсюда – к увеличению концентрации образованных газов.

12. Коэффициент усадки стружки зависит от скорости резания для определенных значений подачи, и может быть определен расчетным путем через зависимость с гиперболическим тангенсом.

13. Рассмотрена и теоретически обоснована гипотеза о том, что с повышением средней температуры стружки вследствие трения ее с инструментом происходит дальнейшее ее увеличение после выходе ее из зоны контакта за счет химического взаимодействия элементов поверхностных слоев с кислородом атмосферного воздуха.

14. На основании исследований и проведенных расчетов выявлено, что применение математического моделирования диффузии и газообразования, а также самой оценки газообразования позволяет исследовать механизм взаимодействия не только металлов с твердыми сплавами, но и минералокерамическими или диэлектрическими материалами.

Математические модели разрушения при механообработке

LAP Lambert Academic Publishing (2019-06-18)

€ 35,90

[Buy at the MoreBooks! Shop](#)

Целью данных исследований является вопрос о возникновении в зоне обработки резанием высоких температур в результате внутреннего или внешнего трения, способствующих выгоранию примесных элементов из снимаемой стружки и образование летучих соединений при контакте обрабатываемого материала с атмосферным воздухом. Исходя из оценки физико-механических свойств и химической структуры составляющих системы ЗИССо (заготовка - инструмент - стружка - среда охлаждения): – во-первых, рассматриваются процессы образования газовых соединений с точки зрения взаимодействия элементов системы ЗИССо; – во-вторых, формируются общие требования, которым должны удовлетворять новые методики экспериментального определения концентрации образованных газообразных соединений в зоне обработки изделий на механических операциях; – в-третьих, намечаются пути дальнейшего совершенствования методики исследования диффузионных процессов и анализа газообразования, дается ряд практических рекомендаций.

Book Details:

ISBN-13:	978-620-0-21448-5
ISBN-10:	6200214484
EAN:	9786200214485
Book language:	Russian
By (author) :	Олег Никуленков Игорь Швецов
Number of pages:	84
Published on:	2019-06-18
Category:	Monographies

Целью данных исследований является вопрос о возникновении в зоне обработки резанием высоких температур в результате внутреннего или внешнего трения, способствующих выгоранию примесных элементов из снимаемой стружки и образование летучих соединений при контакте обрабатываемого материала с атмосферным воздухом. Исходя из оценки физико-механических свойств и химической структуры составляющих системы ЗИССо (заготовка - инструмент - стружка - среда охлаждения): – во-первых, рассматриваются процессы образования газовых соединений с точки зрения взаимодействия элементов системы ЗИССо; – во-вторых, формируются общие требования, которым должны удовлетворять новые методики экспериментального определения концентрации образованных газообразных соединений в зоне обработки изделий на механических операциях; – в-третьих, намечаются пути дальнейшего совершенствования методики исследования диффузионных процессов и анализа газообразования, дается ряд практических рекомендаций.



Никуленков Олег Викторович - преподаватель высшей квалификационной категории, доцент кафедры промышленных технологий НовГУ имени Ярослава Мудрого, кандидат технических наук, доцент. Швецов Игорь Васильевич - заведующий кафедрой энергетики и транспорта НовГУ имени Ярослава Мудрого, доктор технических наук, профессор, Академик Российской Академии Естественных наук.



978-620-0-21448-5