

М. В. КАСЬЯН, Ф. А. ПАРИКЯН, И. Р. ИВАНОВ

## ВЛИЯНИЕ ГАЗОВЫХ СРЕД НА ПРОЦЕСС СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Изучение влияния отдельных компонентов воздуха на процесс стружкообразования представляет определенный интерес, поскольку позволяет лучше понять физико-химические явления на контактных поверхностях и приблизиться к раскрытию сути некоторых явлений, сопровождающих процесс стружкообразования и образование обработанной поверхности.

С этой целью процесс стружкообразования в среде кислорода, азота, аргона, а также в воздухе нами исследован в специальной вакуумной камере [8] по методике, позволяющей доводить до минимума влияния остаточных газов камеры на процесс резания [1].

Обрабатывалась сталь 20 инструментом из Т5К10 в интервале скоростей от 6 до 153 м/мин, при постоянной подаче  $S=0,1$  мм/об, глубине резания  $t=0,8$  мм и неизменной геометрии режущей части пластины  $\alpha=0$ ,  $\alpha=8^\circ$ ,  $\varphi=90^\circ$ ,  $\lambda=0$ .

### Влияние газовых сред на контактные процессы в зоне стружкообразования

Важность рассматриваемого вопроса диктуется тем, что влияние газовой среды на процесс стружкообразования в основном проявляется через изменение характеристик контактных процессов, которые в конечном

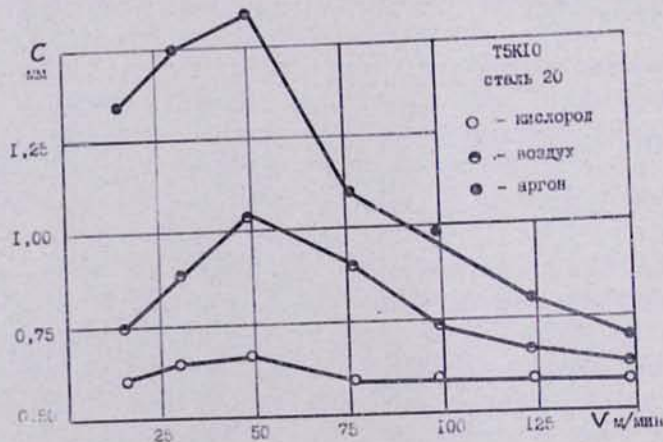


Рис. 1. Зависимость длины контакта стружки  $C$  с передней поверхностью реза от скорости резания в газовых средах.

итоге определяют величину и закономерности изменения условного коэффициента трения  $\mu_{\text{усл}}$ . Из рис.1 следует, что с увеличением скорости резания длина контакта стружки с резцом в различных газовых средах уменьшается, кроме диапазона скоростей 15—50 м/мин, где наблюдается ее увеличение до максимального значения. Одновременно с увеличением скорости резания уменьшается разница между длиной контакта стружки с передней поверхностью инструмента в окислительной и нейтральной средах, и начиная примерно со скорости 153 м/мин и выше газовые среды практически не влияют на эту величину. При скоростях 30—50 м/мин, когда существуют все условия для интенсивного наростообразования, длина контакта увеличивается, и в этом главная роль принадлежит развитию адгезионных явлений.

В среде аргона, азота и в вакууме основным видом взаимодействия контактных поверхностей является схватывание, при котором частицы материала стружки как бы «привариваются» к инструментальному материалу и остаются на его поверхности. При этом большую часть измеренной площади контакта составляет зона адгезионного схватывания.

На некотором расстоянии от режущей кромки наблюдается интенсивное схватывание отдельных участков трущихся поверхностей, и контакт принимает дискретный характер. В связи с дискретностью контактирования и неравномерностью напряженного состояния в зонах как элементарного, так и общего контакта возникают и устанавливаются металлические связи, обусловленные сложным взаимодействием физических рельефов контактных поверхностей. Очевидно, что на контактные процессы, кроме макроскопических параметров, влияют и характеристики внутреннего строения поверхностных слоев трущихся поверхностей. При трении стружки о переднюю поверхность, в результате воздействия высоких контактных давлений и напряжений, в отдельных точках металлического контакта трущихся поверхностей мгновенно возникает лес дислокаций [2] и вследствие этого большое количество новых неровностей. В этом случае общая работа резания расходуется как на развитие несовершенств кристаллической решетки металла, так и на увеличение энергии их взаимодействия. Резкое увеличение плотности вакансий и дислоцированных атомов при высокой степени пластической деформации, с одной стороны, локальные высокие температуры и свежесформированные химически чрезвычайно активные ювенильные поверхности, с другой стороны, способствуют протеканию диффузионных процессов в указанных активных слоях. В случае, когда окружающей средой является нейтральный газ—аргон, адсорбцией которого ввиду ее незначительности можно пренебречь, диффузионные процессы реализуются за счет взаимной диффузии между активизированными контактными поверхностями, приводящей к большому развитию процесса схватывания и соответственному увеличению длины контакта.

Все сказанное хорошо подтверждается проведенными нами опытами, согласно которым во всем исследованном диапазоне скоростей резания

длина контакта стружки с резцом  $C$  в аргоне больше, чем в воздухе и кислороде.

Газовые среды, наряду с влиянием на общую длину контакта, изменяют и отношение к ней длины пластического контакта. Как показывают данные табл. 1, отношение между длиной застойной зоны  $C_1$  и общей длиной контакта  $C$  при резании в воздухе и аргоне изменяется незначительно в достаточно широком диапазоне скоростей резания и остается близким к 0,5 (в аргоне  $\sim 0,55$ ).

Таблица 1

|                                              | $V, \text{ м/мин}$ |      |      |      |      | Примечание        |
|----------------------------------------------|--------------------|------|------|------|------|-------------------|
|                                              | 15                 | 30   | 49   | 97   | 123  |                   |
| $\frac{C_1}{C}$                              | 0,32               | 0,4  | 0,45 | 0,3  | 0,25 | Кислородная среда |
| $\frac{C_1}{C}$                              | 0,52               | 0,51 | 0,55 | 0,5  | 0,45 | Воздух            |
| $\frac{C_{\text{возд.}}}{C_{\text{кисл.}}}$  | 1,25               | 1,35 | 1,5  | 1,25 | 1,1  | —                 |
| $\frac{C_{\text{арг.}}}{C_{\text{кисл.}}}$   | 2,2                | 2,3  | 2,4  | 1,65 | 1,35 | —                 |
| $\frac{C_1 \text{ возд.}}{C_{\text{кисл.}}}$ | 1,9                | 1,65 | 1,8  | 1,6  | 1,2  | —                 |

Из приведенных данных видно также, что длина контакта в воздухе в 1,5, а в аргоне в 2,4 раза больше, чем в среде кислорода. Причем максимальная разница отмечается в зоне скоростей, характеризующейся интенсивным наростообразованием.

Сопоставляя полученные длины общего и пластического контакта, нетрудно заметить, что в воздухе длина  $C_1$  до 1,8 раза больше, чем в кислороде ( $V=49 \text{ м/мин}$ ), в то время как общая длина больше в 1,5 раза. Отсюда следует, что в среде кислорода по сравнению с воздухом и аргоном длина контакта уменьшается за счет упруго-пластического участка контакта, но одновременно с этим резко суживается и участок пластического контакта.

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что уменьшение длины контакта, независимо от того, обусловлено ли это влиянием газовых сред или скоростью резания, сопровождается повышением удельного контактного давления. Не рассматривая в подробности механизм влияния газов с увеличением скорости резания, отметим лишь, что уменьшение при этом длины контакта приводит к снижению влияния газовых сред на эту же величину, поскольку по мере уменьшения длины контакта [3] снижается чувствительность контактных характеристик к факторам, действующим на них через изменение граничного давления.

Известно, что в процессе резания металлов, характеризуемом значи-

тельными пластическими деформациями, происходит непрерывное образование идеально чистой металлической поверхности с предельно искаженной кристаллической решеткой. Причем пластическая деформация осуществляется путем движения, развития и взаимодействия дислокаций, приводящих к резкому увеличению концентрации вакансий и дислоцированных атомов в поверхностных контактных микрообъемах. Такое увеличение концентрации различных дефектов приводит к повышению свободной поверхностной энергии и следовательно, к активизации контактных поверхностей и развитию диффузионных явлений.

Таблица 2

|                                                 | С т а л ь 20       |         |      |        |         |         |         |         |         |
|-------------------------------------------------|--------------------|---------|------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                 | Кислород           |         |      | Воздух |         |         | Аргон   |         |         |
|                                                 | Инструм. Ток10     |         |      |        |         |         |         |         |         |
|                                                 | $V, \text{ м/мин}$ |         |      |        |         |         |         |         |         |
|                                                 | 30                 | 49      | 97   | 30     | 49      | 97      | 30      | 49      | 97      |
| $\gamma_d^\circ$                                | 21° 30'            | 17°     | 7°   | 23°    | 11° 45' | 9°      | 25°     | 14° 30' | 11° 30' |
| $h_{\text{нар}} \text{ мм}$                     | 0,28               | 0,25    | 0,08 | 0,31   | 0,28    | 0,16    | 0,4     | 0,39    | 0,18    |
| $C, \text{ мм}$                                 | 0,65               | 0,66    | 0,58 | 0,92   | 1,05    | 0,7     | 1,5     | 1,6     | 0,98    |
| $\mu_{\text{усл.}}$                             | 1,05               | 0,92    | 0,72 | 1,2    | 1,05    | 0,925   | 1,35    | 1,2     | 1,09    |
| $\beta^\circ$                                   | 29° 30'            | 30° 30' | 27°  | 28°    | 24° 30' | 22° 30' | 23° 30' | 22°     | 20° 30' |
| $q_N \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$             | 30,0               | 31,0    | 57,5 | 25,0   | 26,0    | 51,5    | 20,3    | 19,0    | 41,5    |
| $A_c \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$             | 265                | 254     | 362  | 335    | 307     | 410     | 460     | 386     | 492     |
| $A_{\text{пл}} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$   | 183,5              | 170,5   | 266  | 229    | 196     | 290     | 299     | 255     | 358     |
| $H_{\text{цедв}} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ | 225                | 235     | 250  | 240    | 270     | 270     | 264     | 280     | 270     |
| $H_{\text{нар}} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  | 500                | 460     | 410  | 465    | 430     | 395     | 425     | 385     | 375     |

В случае резания в среде аргона эти явления, как было показано выше, приводят к схватыванию трущихся поверхностей. В кислороде же, химическая активность которого чрезвычайно высока, в результате физико-химической адсорбции, а также реакции окисления происходят качественные изменения во взаимодействии между контактными поверхностями стружки и инструмента. Конечным результатом такого воздей-

ствия является снижение поверхностной свободной энергии—работы образования новых поверхностей (в данном случае стружки).

Образование пленок диссоциированного кислорода (путем хемосорбции), а также пленок окислов (путем реакции окисления) на контактных поверхностях инструмента и стружки или только инструмента способствует значительному снижению или полному исключению адгезии на большей части площади контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

Таким образом, при резании в среде кислорода устраняется значительная часть металлического дискретного контакта, и явления схватывания, весьма развитые в аргоне, переходят в граничное трение между контактными поверхностями (в первом приближении похожее на внешнее «сухое» трение).

Кислородная среда, по сравнению с аргоном и частично воздухом, приводит к качественным изменениям в граничных условиях контакта и обеспечивает условия пластичности и непрерывного течения металла. И поскольку одно из важнейших проявлений действия кислорода связано с уменьшением схватывания трущихся поверхностей, то это приводит к значительному снижению адгезионной составляющей силы трения, условного коэффициента трения и, в конечном итоге, к снижению общего сопротивления резанию.

### Влияние газовых сред на процесс наростообразования

Микрофотографии корней стружек (рис. 2) показывают, что окислительные и нейтральные среды оказывают значительное влияние на геометрическую форму и размеры нароста как при низких, так и высоких скоростях резания. Следует отметить, что графоаналитической обработке подвергались те корни стружек, в которых был зафиксирован наибольший нарост.

В среде аргона, где существуют все условия для интенсивного развития процессов схватывания трущихся поверхностей, нарост распространяется на большей длине передней поверхности резца, чем при резании в среде кислорода. В этих условиях вершина нароста, выполняющая функцию режущей кромки, сильно развивается и образует значительно больший радиус округления ( $\rho_n = 0,175 \text{ мм}$ ), чем вершина нароста в кислороде ( $\rho_n = 0,035 \text{ мм}$ ). Исходя из этих данных, можно провести аналогию между вершиной нароста, полученной в кислороде, с острозаточенным инструментом, с одной стороны, и между режущей кромкой со сравнительно большим радиусом округления и вершиной нароста при резании в аргоне—с другой стороны. Во втором случае большой радиус  $\rho_n$  предопределяет изменение переднего угла до отрицательных величин, особенно при переходе в сторону задней поверхности резца (рис. 3).

С увеличением  $\rho_n$  при относительно малой толщине среза ( $0,1 \text{ мм}$ ), возрастает роль криволинейного участка ОА. Кроме того, при постоян-

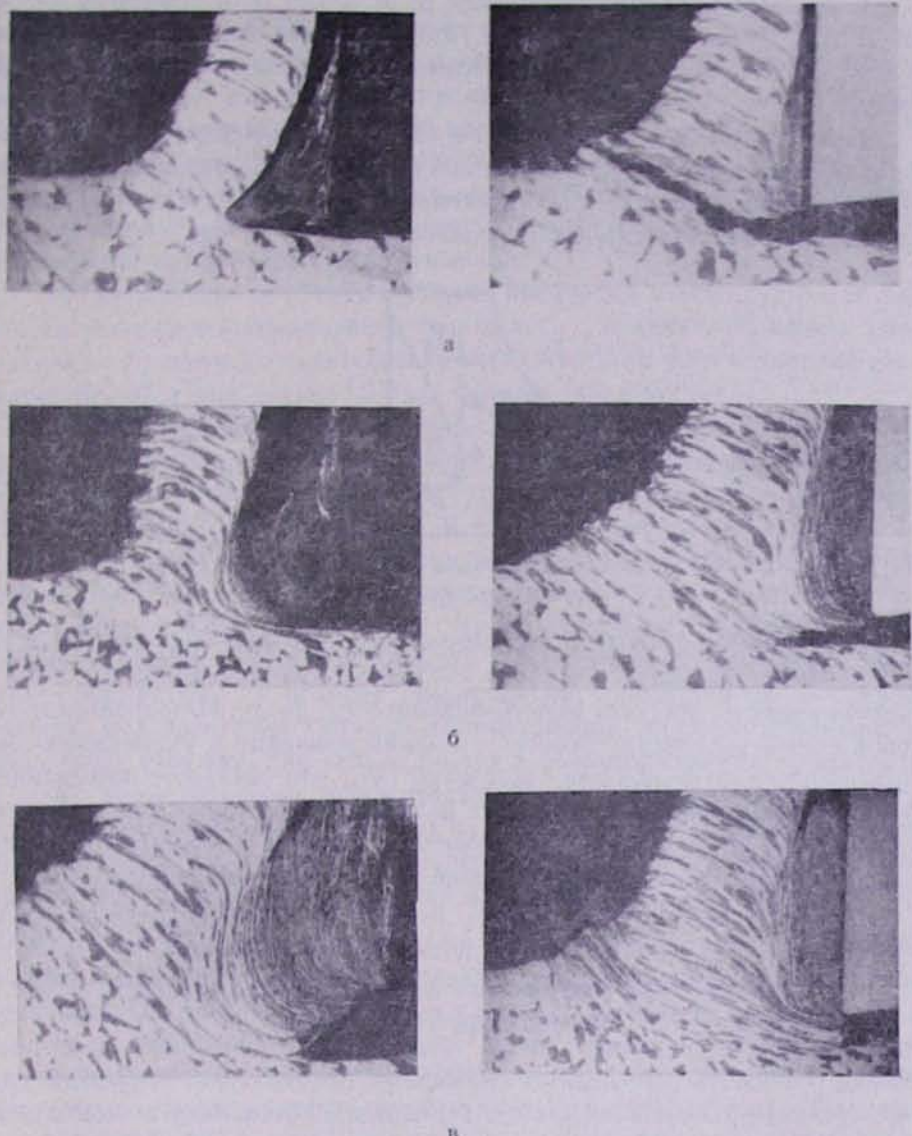


Рис. 2. Микрофотографии корней стружек, стали 20, Т5К10 ( $\times 83$ ), полученных при резании в газовых средах: а—кислород, б—воздух, в—аргон.

ной толщине среза увеличение  $r_n$  при переходе от кислородной среды к аргону приводит к замене почти прямолинейного контакта нароста со срезаемым слоем на криволинейный контакт. Следовательно, нарост с большим  $r_n$  будет действовать на срезаемый слой переменными отрицательными передними углами, приводящими к более сложным условиям пластической деформации. При этом увеличивается роль сжимающих напряжений, в результате чего уменьшается угол сдвига  $\beta$ , который в свою очередь, приводит к возрастанию сил и усадке стружки по сравнению с таковыми при резании в среде кислорода [1, 8].

С увеличением скорости резания до 97 м/мин геометрическая форма нароста при резании в различных газовых средах несколько стабилизируется, что, по-видимому, обусловлено некоторым снижением влияния среды.

При резании в окислительных и нейтральных газовых средах наряду с формой нароста меняются и его размеры. Высота нароста является важной характеристикой, поскольку в некоторой степени определяет величину действительного переднего угла  $\gamma_d$ .

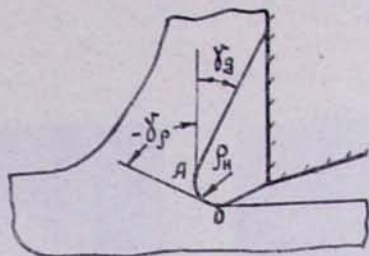


Рис. 3. Влияние криволинейного участка вершины нароста OA на изменение переднего угла.

При резании стали 20 со скоростью 49 м/мин инструментом из Т5К10 высота нароста  $h_n$  в среде кислорода составляет 0,25 мм, а в аргоне доходит до 0,39 мм, то есть больше в 1,5 раза. Независимо от газовой среды увеличение скорости резания приводит к уменьшению высоты нароста до 2—2,5 раз. Согласно [4], это связано с повышением скорости (температуры) до таких величин, при которых снижается сопротивление обрабатываемого материала сдвигу, сокращаются размеры зоны, в пределах которой условие пластичности не выполняется.

Наряду с влиянием на форму и размеры нароста, газовые среды оказывают значительное влияние на прочность, следовательно, и на устойчивость нароста. Из табл. 2 следует, что микротвердость нароста в кислороде в среднем в 1,2 раза выше, чем в аргоне. Повышенную микротвердость нароста в среде кислорода по сравнению с аргонem нельзя объяснить одним лишь снижением температуры в среде кислорода (такое объяснение было бы неполным), поскольку в этом случае окислительные явления приводят к качественно новым изменениям.

Дело в том, что под действием значительных пластических деформаций в наросте увеличивается плотность точечных дефектов—вакансий и межузельных атомов, наличие которых обуславливает протекание интенсивной диффузии кислорода в тело нароста и образование твердого раствора, способствующего повышению общей микротвердости нароста.

С другой стороны, с точки зрения дислокационного механизма пластической деформации и упрочнения, согласно которой с повышением степени пластической деформации плотность дислокаций и соответственно микротвердость повышаются, следовало бы ожидать большей микротвердости нароста в аргоне, чем в кислороде. Однако отмеченное в

действительности обратное явление свидетельствует о том, что часть дислокационных дефектов, обусловленных пластическим деформированием, имеет более высокую энергию активации [5] и сохраняется при температуре, возникающей в среде кислорода.

Кислород путем изменения контактных процессов в зоне стружкообразования способствует уменьшению сил трения и, следовательно, дополнительной деформации прирезцової поверхности стружки при ее скольжении по передней поверхности.

Об уменьшении сил трения в среде кислорода можно судить по величине условного коэффициента трения  $\mu_{\text{усл.}}$ , величина которого, рассчитанная с учетом действительного переднего угла  $\gamma_d$  в интервале скоростей 30—97 м/мин, в 1,3—1,5 раза меньше, чем в аргоне.

Микрофотографии корней стружек (рис. 2) показывают, что в кислороде при средних скоростях резания прирезцовая поверхность стружки гладкая, искривление линии текстуры наблюдается только непосредственно у контактной поверхности. В воздухе, и особенно в аргоне, контактные слои стружки под действием больших сил трения подвергаются интенсивному пластическому деформированию, в результате чего возникает значительное искривление линий текстуры. Причем у самой вершины нароста, где поток металла разветвляется, линии текстуры менее искривлены, и по мере удаления по направлению движения стружки, под действием сильного сопротивления передней поверхности резца сходу стружки, они искривляются в большей степени и становятся почти параллельными непосредственно к контактной поверхности. При этом интенсивные контактные пластические деформации приводят к образованию на контактных поверхностях стружек грубых пачек сдвигов, в то время как при резании в кислороде подобного явления не обнаруживается.

### Влияние газовых сред на направление наибольших сдвигающих напряжений

Через изменение напряженно-деформированного состояния срезаемого слоя, условного коэффициента трения и работы стружкообразования газовые среды оказывают влияние на изменение пути резца, необходимого для формирования элемента стружки, следовательно, и на среднее направление наибольших сдвигающих напряжений, характеризующихся условным углом сдвига  $\beta$ .

Графическая обработка микрофотографий корней стружек показала, что в среде кислорода, по сравнению с воздухом и аргонem, при постоянной скорости резания увеличивается угол сдвига  $\beta$ .

Так, при  $V=49$  м/мин в кислороде  $\beta=30^\circ 30'$ , в воздухе  $24^\circ 30'$ , а в аргоне  $22^\circ$ . С увеличением скорости резания до 97 м/мин газовые среды оказывают примерно такое же влияние на угол  $\beta$ , хотя разница при переходе от кислорода к аргону несколько снижается. Из этого следует, что в кислороде ускоряется процесс разрушения обрабатываемого металла и тем самым уменьшается работа пластической деформации.

нии стружки, а также работа, затрачиваемая на преодоление сил трения на контактных поверхностях инструмента. С уменьшением  $\mu_{\text{усл}}$  в кислороде снижаются силы и работа трения, и тогда сдвиг и разрушение металла происходят раньше, чем он успевает перейти в более хрупкое состояние, в результате чего увеличивается угол сдвига  $\beta$ .

Измерение микротвердости в зоне стружкообразования  $H_{\text{сдв}}$  (табл. 2), а также микрофотографии корней стружек показывают, что в кислороде, по сравнению с воздухом и аргоном, уменьшается объем зоны пластически деформированного металла, находящегося перед резцом. Сужение зоны стружкообразования в кислороде происходит вследствие более интенсивного поворота начальной границы зоны стружкообразования по часовой стрелке относительно вершины резца, в то время как конечная граница смещается значительно меньше. В результате этого начальная и конечная границы зоны стружкообразования сближаются, и тогда частицы металла, вследствие сокращения промежутка времени на прохождение частиц обрабатываемого материала через эту зону, получают упрочнение непосредственно у условной плоскости сдвига, причем тем меньшее, чем меньше ширина зоны стружкообразования. Именно этим обусловлено снижение степени пластической деформации в зоне стружкообразования при резании в среде кислорода, о чем можно судить по измерению микротвердости  $H_{\text{сдв}}$ .

Вышеуказанное действие кислорода можно сравнить с влиянием скорости резания (деформации) на степень пластической деформации и ширину зоны стружкообразования.

Независимо от того, происходит ли сужение зоны стружкообразования от увеличения скорости резания или от влияния кислорода, согласно формуле (1), это приводит к повышению средней скорости деформации сдвига.

Если исходить из схемы с параллельными границами стружкообразования, можно ориентировочно подсчитать скорость деформации сдвига при резании в различных газовых средах, которая определяется следующей зависимостью [6]:

$$C_{\text{сдв}} = \frac{16,65 V \cdot \cos \gamma_1}{\Delta S_1 \cos (\beta - \gamma_1)} \quad 1/\text{сек}, \quad (1)$$

где  $\Delta S_1$ —ширина зоны стружкообразования, которая определялась по микрофотографиям зафиксированных корней стружек. Согласно [7], определение величины  $\Delta S_1$  таким методом является приближенным, поскольку видимые изменения микроструктуры соответствуют значительным деформациям. Несмотря на это, таким способом можно получить сравнительное представление о скоростях деформации и характеризовать порядок их величин. Полученные расчетные величины  $C_{\text{сдв}}$  для  $V=97$  м/мин сведены в табл. 3.

Из этих данных следует, что скорость деформации в кислороде, по сравнению с воздухом и аргоном, соответственно больше почти в 1,2 и 1,5 раза. Принимая во внимание, что при средних скоростях резания влияние сред на стружкообразование в целом и на ширину зоны струж-

Таблица 3

|                                      | Кислород | Воздух | Аргон | Примечание |
|--------------------------------------|----------|--------|-------|------------|
| $\Delta S_1, \text{мм}$              | 0,205    | 0,239  | 0,29  | Сталь 20   |
| $C_{\text{ср}} \frac{1}{\text{сек}}$ | 8320     | 6860   | 5525  | T5K10      |

стружкообразования в частности сказывается сильнее, чем при высоких скоростях, можно предположить, что отношения скорости деформации сдвига в кислороде и аргоне будут соответственно больше.

С увеличением скорости резания до 153 м/мин влияние активных и неактивных газовых сред на весь процесс стружкообразования снижается, и можно считать, что выше  $V=153$  м/мин оно практически отсутствует. На это указывает снижение разницы абсолютных величин исследуемых параметров при переходе от кислорода к аргону.

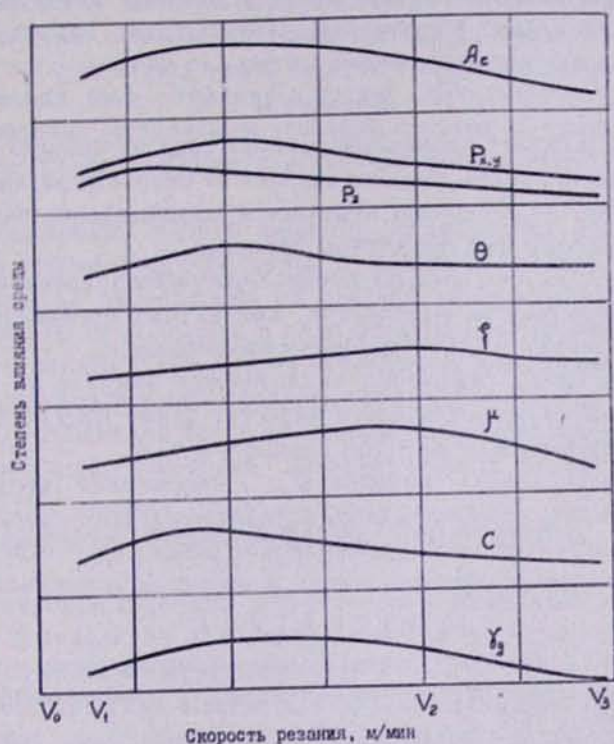


Рис. 4. Схема влияния газовых сред на процесс резания.

Снижение влияния газовых сред на процесс резания с увеличением скорости резания происходит в силу следующих причин:

1) решающим фактором является повышение средней температуры в зоне резания, в результате которого контактные слои размягчаются и образуют сплошной контакт между стружкой и резцом, что затрудняет проникновение газов в зону резания;

2) с увеличением скорости резания разрушенные и унесенные сбегающей стружкой адсорбированные пленки не успевают возобновиться.

из-за низкой скорости химической реакции по сравнению со скоростью деформации, и условия резания приближаются к условиям трения в воздухе и инертной среде;

3) с уменьшением длины контакта стружки с резцом (при увеличении скорости резания) снижается влияние газовых сред на эту же величину, и тогда контактные характеристики становятся менее чувствительными к изменениям такого внешнего фактора, каким является газовая среда.

Таким образом, резюмируя вышесказанное, можно заключить, что влияние газовых сред на процесс стружкообразования проявляется в различной степени в зависимости от диапазона изменения скорости резания. Сказанное схематически представлено на рис. 4.

Здесь можно различить зону малых скоростей  $V_0-V_1$  (6—15 м/мин), где влияние среды небольшое, зону скоростей  $V_1-V_2$  ( $V=15-17$  м/мин) с максимальным влиянием газовых сред и, наконец, диапазон скоростей  $V_2-V_3$  (97—153 м/мин) с постепенным снижением влияния газовых сред, которое практически отсутствует выше скорости  $V_3$ .

### Выводы

1. Степень влияния различных газовых сред на процесс стружкообразования в значительной степени зависит от скорости резания. В диапазоне скоростей 15—97 м/мин отмечается максимальное влияние газовых сред на исследуемые параметры процесса.

2. Влияние газовых сред на процесс стружкообразования проявляется через изменение характеристик контактных процессов, которые определяют величину и закономерности изменения  $\mu_{\text{усл.}}$ .

3. Газовые среды оказывают значительное влияние на геометрическую форму, размеры и прочность нароста, длину контакта стружки с резцом, контактные нагрузки, угол сдвига  $\beta$  и т. д.

4. В среде кислорода снижение  $\mu_{\text{усл.}}$ , возрастание твердости и устойчивости нароста, снижение дополнительного деформирования стружки при ее трении о переднюю поверхность резца способствует установлению мягкой схемы деформирования в процессе стружкообразования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. М. В. Касьян, Ф. А. Парикян. Влияние содержания карбида титана в твердом сплаве на процесс резания в различных газовых средах. «Физика резания металлов», вып. 2, Ереван, 1972.
2. И. Г. Носовский. Влияние газовой среды на износ металлов. Киев, «Техніка», 1968.
3. М. Ф. Полетика. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М. «Машиностроение», 1969.
4. Н. Н. Зорев. Вопросы механики процесса резания металлов. М., Машгиз, 1956.
5. И. И. Василенко. О характере повышения твердости поверхностей трения. «Влияние рабочих сред на свойства материалов», вып. 3, Киев. «Наукова думка», 1964.
6. Оксли. Скорость деформации при резании металлов. Американское общество инженеров механиков. Труды, серия В, т. 85, № 4, 1963.
7. Н. Н. Зорев. Исследование процесса резания металлов в США, вып. 2, НИИМАШ, 1965.
8. М. В. Касьян, Ф. А. Парикян. Экспериментальная установка для резания в вакууме и газовой среде. «Станкостроение», № 14, 1972.