

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КИНОСЪЕМКИ

Ю. А. РОЗЕНБЕРГ, И. Б. ФИЛИПЧЕНКО

(Представлено проф. докт. А. М. Розенбергом)

Рядом работ, проведенных в последнее время по исследованию процесса резания хрупких металлов (например, серого чугуна) [1, 2, 3, 4, 5] и др., показано, что этот процесс имеет определенные закономерности: при резании образуется стружка скалывания. Процесс резания представляет собой процесс хрупкой деформации сдвига: на инструменте образуется нарост; силы резания, коэффициенты трения, геометрия нароста, угол, определяющий направление плоскости сдвигов, и пр., находятся в определенной зависимости от параметров режима резания и т. д. Все это определено путем замера сил резания, наблюдения внешней формы стружки, наблюдения в микроскоп зоны стружкообразования и т. д. В то же время интересно было бы провести исследование процесса образования отдельных элементов стружки, их деформации и скола с применением метода киносъемки, который позволил бы зафиксировать отдельные стадии, их последовательность и закономерность развития элемента и соответственно внести коррективы в теорию этого процесса. Такое исследование проводится в лаборатории резания металлов Томского политехнического института. Киносъемка производилась как при резании «хрупких» металлов (серый чугун, ковкий чугун, латунь ЛС-59-1), так и при резании «пластичных» металлов (сталь 45, сталь 20X, медь, алюминиевый сплав). Исследование делится на две части. Первая часть включает опыты на средних скоростях резания от 5 до 60 м/мин. Резание производилось как быстрорежущими резцами, так и резцами, оснащенными пластинками твердого сплава ВК-8. При резании меди и алюминиевого сплава применялись резцы с передним углом, равным  $+25^\circ$  (такая геометрия была необходима для получения сливной стружки). Все остальные металлы обрабатывались резцами с передними углами, равными  $+10^\circ$ — $11^\circ$ . Толщина среза изменялась в пределах от 0,22 до 0,67 мм/об. Данная серия опытов проводилась на жестком токарном станке с применением скоростной кинокамеры СКС-1, позволяющей производить съемку со скоростью до 5300 кадров в секунду. Съемка производилась с 3—9-кратным увеличением на пленку. Обрабатываемая деталь, представляющая круглую болванку, закреплялась в патроне станка. На конце этой болванки вытачивалось ребро толщиной 3 мм и высотой не более 10 мм. Резец с державкой  $20 \times 30$  мм закреплялся с минимальным вылетом в суппорте, и резание осуществлялось с поперечной подачей. Для обеспечения совместного

перемещения резца и кинокамеры, последняя закреплялась также на суппорте. Освещение производилось прожекторами точечного типа, используемыми в вертикальных оптиметрах ИКГ. Три таких прожектора, со вставленными в них лампами мощностью 50 ватт и напряжением 12 вольт при подаваемом на них напряжении в 14 вольт, позволяли произвести киносъемку на панхроматическую пленку типа ДН со скоростью в 5000—5300 кадров в секунду и соответствующим ей временем экспозиции в 0,00004—0,000038 секунды.

Вторая часть опытов проведена на микроскоростях от 0,0093 до 0,76 *м мин* на универсально-фрезерном станке методом свободного строгания. Киносъемка производилась операторской кинокамерой с частотой от 8 до 32 кадров в секунду на 35-миллиметровую пленку. Одновременно с киносъемкой процесса резания производилась запись сил резания на пленку осциллографа. Осциллограф через специальную электрическую схему включался вместе с освещением зоны съемки, при этом кинокамера включалась с некоторым опережением. Таким образом обеспечивалась синхронность записи сил и киносъемки процесса резания.

Для измерения сил резания применялся двухкомпонентный упругий динамометр с индуктивными датчиками.

Освещение зоны резания производилось теми же прожекторами, что и в первой части опытов, однако их количество было уменьшено до двух, а напряжение, подаваемое на лампы, снижено до 10 в. В опытах использовались быстрорежущие резцы с передними углами от  $+30^\circ$  до  $-11^\circ$ . Толщина среза изменялась в пределах от 0,1 до 1 *мм*.

В результате проведенных опытов было получено значительное число кинопленок с заснятыми на них кадрами процесса стружкообразования при резании различных металлов при различных условиях. На рис. 1—6 представлены кадры процесса стружкообразования при резании латуни ЛС-59-1, ковкого чугуна и серого чугуна, которые относятся к разряду «хрупких» металлов. Проведенный анализ этих фигур позволяет отметить следующее.

1. При резании латуни, ковкого чугуна и серого чугуна процесс стружкообразования как при микроскоростях, так и при средних скоростях протекает идентично. Стружка имеет элементное строение. С боковой стороны элемент имеет форму трапеции или выпуклого треугольника. Одна из сторон элемента соприкасается с передней гранью инструмента, другая — образуется при конечном сколе элемента.

2. При образовании элемента происходит его пластическая деформация, его форма видоизменяется. Пластические деформации, протекающие внутри элемента, не заканчиваются разрушением элемента. Элементы стружки из серого и ковкого чугуна и латуни имеют достаточную прочность. Для того, чтобы их разрушить, необходимо приложить значительные усилия. Элементы из всех этих металлов позволяют производить на них измерение твердости на приборе Виккерса под нагрузкой в 5—10 *кг*.

Оптическая система, примененная в исследовании, позволяла производить съемку с очень малой глубиной резкости (0,2—0,5 *мм*), однако при этом получено фактически одинаково резкое изображение как обрабатываемой детали, так и стружки. Этот факт говорит о том, что пластические деформации при образовании элемента стружки протекают в плоскостях, параллельных плоскости резания.

3. При достижении определенной степени деформации деформированный объем, лежащий впереди резца, отделяется по поверхности (происходит скол элемента), которую даже при малых скоростях резания, можно с небольшим приближением принять за плоскость. Эта плоскость



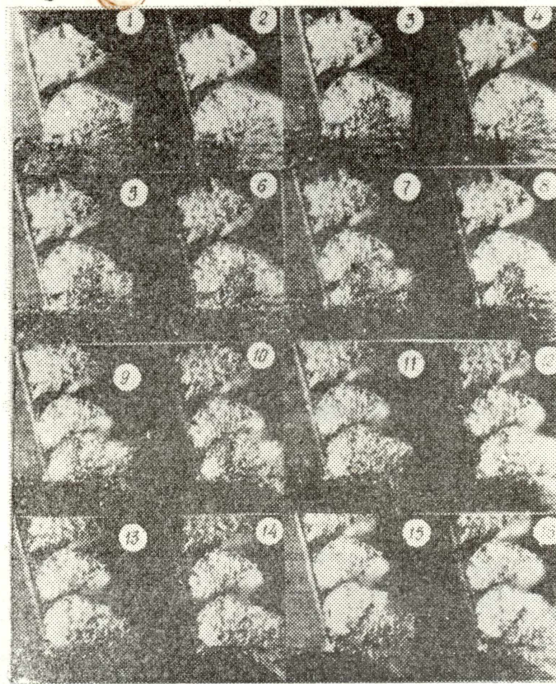


Рис. 1. Кинокадры процесса резания ковкого чугуна при  $V = 25$  мм/мин.,  $a = 0,6$  мм,  $\gamma = 10^\circ$ .

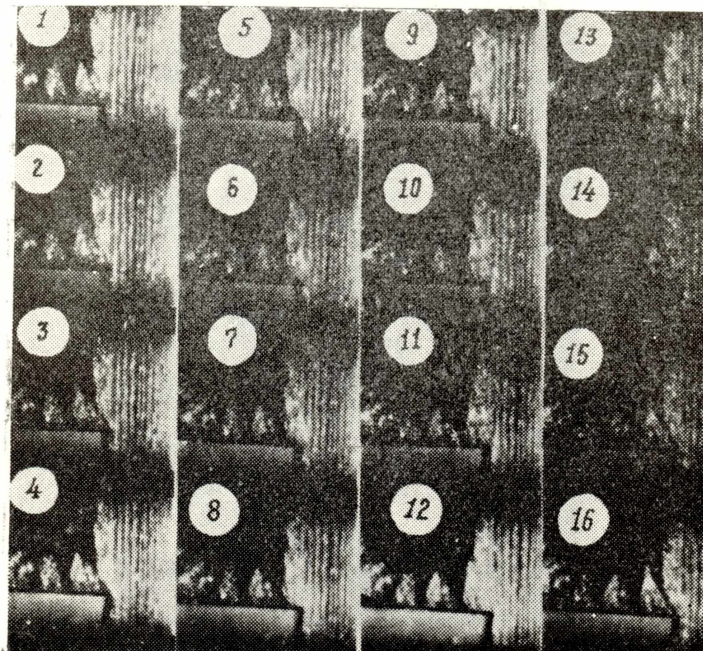


Рис. 2. Кинокадры процесса резания ковкого чугуна при  $V = 13$  м/мин.,  $S = 0,35$  мм об.,  $\gamma = 0^\circ$ .



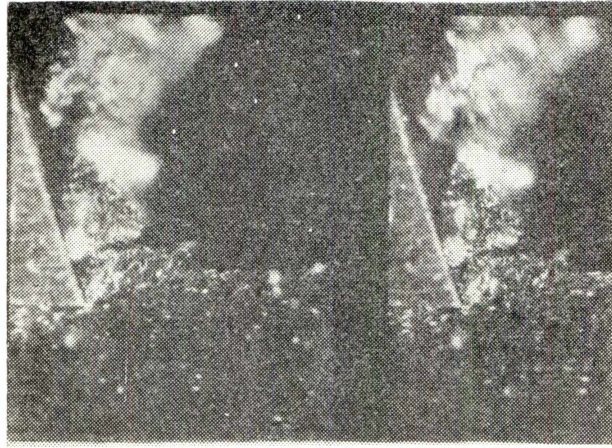


Рис. 3. Кинокадры процесса резания серого чугуна при  $V=98$  мм/мин,  $a=0,2$  мм,  $\gamma=+11^\circ$ .

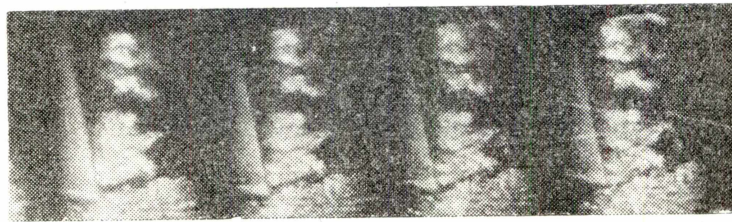


Рис. 4. Кинокадры процесса резания серого чугуна при  $V=30,5$  м/мин,  $S=0,35$  мм/об,  $\gamma=+10^\circ$ .

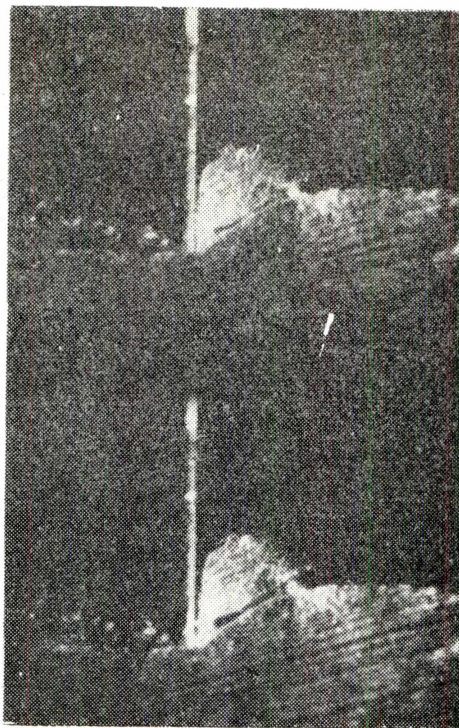


Рис. 5. Кинокадры процесса резания латуни при  $v=9$  мм/мин,  $a=0,4$  мм,  $\gamma=6^\circ$ .



идет под некоторым углом  $\beta_1$  к направлению скорости резания и, как следует из вышеприведенных кадров, имеет место при резании всех исследованных металлов. Угол, под которым проходят конечные сколы элементов, при резании данного металла и при данных неизменных условиях резания имеет определенную постоянную величину. При изменении условий резания (скорости резания, переднего угла и пр.) угол  $\beta_1$  изменяется.

4. Прирезцовый слой стружки, ввиду торможения его передней гранью инструмента, отстает от вышележащих слоев. Этот факт не согласуется с данными С. П. Тамбовцева [6], который утверждает, что прирезцовые слои стружки текут значительно быстрее верхних, и объясняет этим завивание стружки. Необходимо отметить, что факт торможения прирезцовых слоев стружки авторы наблюдали при резании всех иссле-

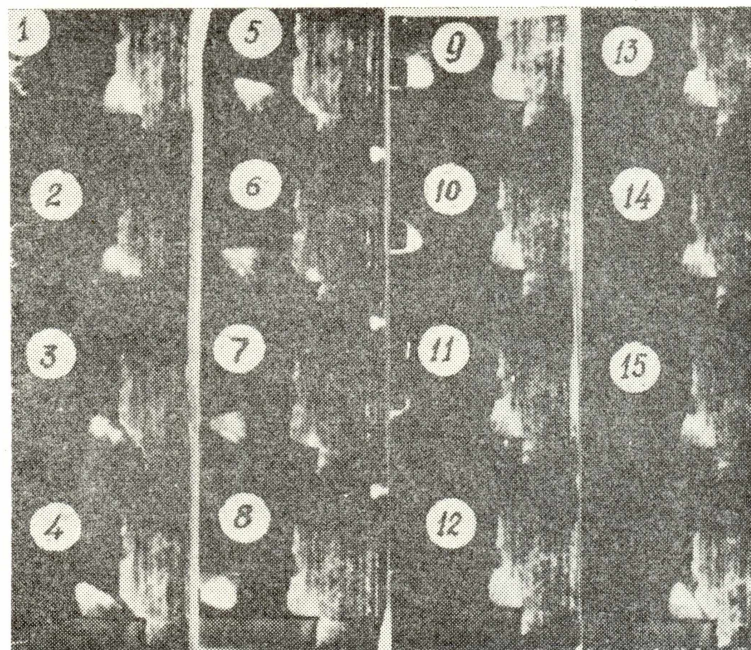


Рис. 6. Кинокадры процесса резания латуни при  $V = 10$  м/мин,  $S = 0,35$  мм/об,  $\gamma = 0^\circ$ .

дуемых металлов. Благодаря этому торможению создается дополнительная деформация прирезцового слоя, которая при определенных условиях приводит к образованию трещин в этом слое (рис. 7).

Резюмируя все вышеотмеченное, можно прийти к выводам, что процесс стружкообразования при резании хрупких металлов имеет определенные закономерности и что этот процесс есть процесс пластической деформации сдвига. С. В. Егоров [7], изучая процесс резания стали 45, жаропрочной стали и серого чугуна с помощью скоростной кинокамеры СКС-1, пришел к выводу, что процесс резания есть процесс несвободного пластического сжатия. С этим утверждением нельзя согласиться потому, что деформация пластического сжатия есть деформация трехмерная, а деформация в процессе резания, как видно из наших опытов, есть деформация плоская. Плоская деформация может быть только простым сдвигом. Точно такой же результат был получен и Куфаревым Г. Л. [8], но с использованием иной методики.

Исследованием процесса резания методом скоростной киносъемки занимался С. С. Некрасов [9]. На основании этих исследований он утверждает, что при резании серого чугуна, под действием передней



границы резца происходит сжатие впереди лежащего слоя металла. При достижении напряжения сжатия максимальной допустимой величины происходит выкалывание элемента стружки весьма неправильной формы. Отделение стружки серого чугуна происходит преимущественно по включениям углерода, т. е. по наиболее ослабленным местам металла. Этим и объясняется весьма неправильная форма элементов стружки и неровности обработанной поверхности. Одновременно с этим автор указывает, что пластическая деформация при резании серого чугуна отсутствует. Резюмируя данные положения С. С. Некрасова, можно, по-видимому, сказать, что никаких закономерностей при резании серого чугуна нет. И действительно, если стружка скалывается по ослабленным местам, значит нельзя говорить о плоскости максимальных касательных напряжений, значит нет никаких закономерностей изменения

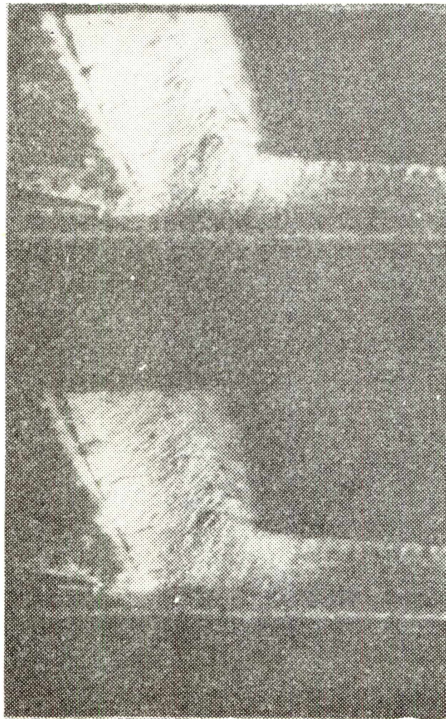


Рис. 7. Кинокадры процесса резания стали 45 при  $V = 9$  мм/мин,  $a = 0,4$   $\gamma = +30^\circ$ .

сил резания с изменением режимов резания, геометрии инструмента, механических свойств обрабатываемого металла. Однако, как видно из вышеприведенного материала и ряда других работ [1], [2], [3], [4], при резании серого чугуна имеет место пластическая деформация сдвига, и скол элементов происходит на плоскости, направленной под определенным углом к направлению скорости резания.

Конечно, графитовые включения в чугуне делают этот металл неоднородным, нарушают его целостность и до некоторой степени искажают закономерности процесса его резания, но только до некоторой степени. В целом на базе большого числа испытаний эти закономерности четко выявляются.

При рассмотрении полученных в наших исследованиях результатов могут возникнуть сомнения в том, что заснятые с боковой поверхности металла кадры процесса стружкообразования не отражают действительных явлений, происходящих внутри металла. Однако опыты, проведенные с одновременной

съемкой процесса и записью сил резания, позволяют считать, что явления, наблюдаемые на боковой поверхности, в общем совпадают с явлениями, происходящими внутри металла. Так, при сопоставлении заснятых кадров процесса стружкообразования и кривых изменения сил резания видно (рис. 8), что при образовании элемента сила  $P_z$  возрастает, достигает максимума и в момент наблюдаемого скола резко падает.

Кроме того, при скоростной киносъемке кинокамерой СКС-1 был использован отметчик времени, который позволил определить пути образования одного элемента стружки. Этот путь образования одного элемента можно связать с величиной конечного угла сдвига  $\beta_1$ . Чем меньше угол  $\beta_1$ , тем больше должен быть путь образования элемента. Это положение было подтверждено проведенными опытами.

В заключение необходимо отметить, что метод киносъемки при исследовании процесса резания металлов действительно позволяет вскрыть ряд особенностей этого процесса. Так, например, известно, что при обра-



зовании на передней грани инструмента нароста передний угол инструмента возрастает и силы резания уменьшаются. Однако В. Б. Лившиц, проводя исследование динамики точения алюминиевого сплава, получила, что при наростообразовании силы резания увеличивались. Произведенная киносъемка процесса резания алюминиевого сплава позволила определить, что в этом случае нарост на резце имеет своеобраз-

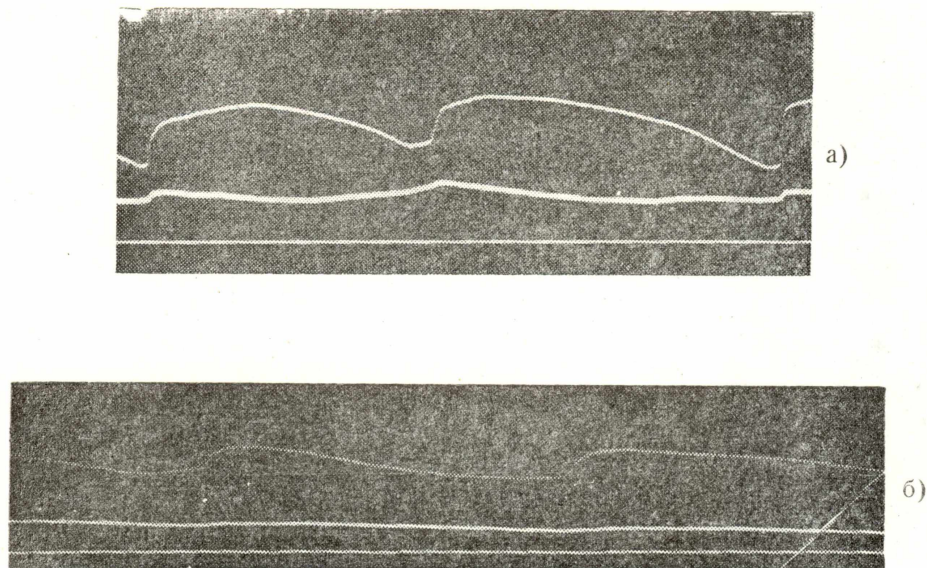


Рис. 8. Осциллограммы сил при резании:  
 а) ковкого чугуна:  $V=9$  мм/мин.,  $a=0,7$  мм, скорость записи 4 мм/сек.;  
 б) серого чугуна:  $V=9$  мм/мин.,  $a=0,5$  мм,  $f=+11^\circ$ , скорость записи 10 мм/сек.

разную форму и уменьшает передний угол инструмента (рис. 9), в результате чего и возрастают силы резания.

Так же, как и ряду других исследователей [7], [6], [10], нам удавалось заснять процесс наростообразования при резании металлов. Наряду



Рис. 9. Кинокадры процесса резания алюминия.

с этим необходимо все-таки отметить, что полученные при исследовании процесса резания методом киносъемки результаты требуют всегда тщательной проверки, так как здесь фиксируются явления, происходящие на боковых поверхностях стружки, инструмента и т. д.

С. П. Тамбовцев на основании своих исследований [6] делал обобщающий вывод, что «процесс формирования каждого элемента стружки



не является монотонным процессом; наоборот, он протекает неравномерно. Элемент стружки вне зависимости от того, является ли стружка сливной, суставчатой или элементной, формируется периодически из отдельных блоков-кристаллов (зерен) — «субэлементов». Резание сравнительно мягких металлов (сталь 10—15, высокопрочный чугун и т. п.) сопровождается образованием давящего кома, заменяющего собой режущие лезвия. По мере своего увеличения ком располагается на передней грани резца в виде консоли».



Рис. 10. Кинокадры процесса резания меди.

Со всеми этими положениями автора никак нельзя согласиться. Во-первых, на всех полученных нами кадрах процесса стружкообразования при резании металлов никаких «субэлементов» не обнаружено. И на полученных записях сил при резании на микроскоростях, где четко фиксируется любое изменение сил, видно (рис. 8), что силы при образовании одного элемента изменяются монотонно, без скачков. Во-вторых, нам не понятны термины «ком» и «консоль». Если под «комом» подразумевается нарост, налип или вообще заторможенная зона, то эти явления можно наблюдать при кино съемке. Никаких других «комов» мы на наших кадрах обнаружить не могли. А при образовании сливной стружки процесс резания протекает вообще монотонно. Это хорошо видно из рис. 10, где представлен заснятый кадр процесса резания меди.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Розенберг. Исследование процесса резания серого чугуна. Автореферат диссертации, Томск, 1952.
2. А. М. Розенберг, А. Н. Еремин. Элементы теории процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
3. П. Ф. Киселев. Исследование деформации при резании чугуна. Автореферат диссертации, Москва, 1949.
4. А. Я. Артамонов. Исследование обрабатываемости высокопрочного чугуна, Машгиз, 1955.
5. Н. Н. Зорев. Исследование элементов механики процесса резания, Машгиз, 1952.
6. С. П. Тамбовцев. Исследование процесса резания металлов скоростной киносъемкой. Станки и инструменты, № 2, 1957.
7. С. В. Егоров. Исследование процесса стружкообразования методом высокочастотной киносъемки. Вестник машиностроения, № 11, 1953.
8. Г. Л. Куфарев. Экспериментальное изучение пластической деформации при резании металлов. Исследования по физике твердого тела, АН СССР, 1957.
9. С. С. Некрасов. Образование стружки при резании материалов. Научные труды Московского горного института, Сборник № 21, вып. I, 1957.
10. К. Ф. Романов. Исследование процесса стружкообразования на высоких скоростях резания с помощью скоростной киносъемки. Тезисы докладов межвузовской научной конференции по современным проблемам резания металлов, Тбилиси, 1958.