

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ СЕРОГО  
И КОВКОГО ЧУГУНОВ НА МИКРОСКОРОСТЯХ**

Ю. А. РОЗЕНБЕРГ, И. Б. ФИЛИПЧЕНКО

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

Вопросам исследования процесса резания «хрупких» металлов посвящены работы И. А. Тиме [1], К. А. Зворыкина [2], Я. Г. Усачева [3], С. Ф. Глебова [4], И. М. Беспрозванного [5], А. М. Розенберга [6, 13], А. М. Даниэляна [7], В. А. Кривоухова [8], И. Я. Айзенштока [9], М. И. Клушина [10], Н. Н. Зорева [11], Ю. А. Розенберга [12]. В них достаточно подробно разработаны различные аналитические и графические зависимости для расчета сил резания.

Однако все эти зависимости даны для средних и высоких скоростей резания, т. е. для случаев, когда существенное влияние на процесс резания оказывает температура. Кроме того, при таких скоростях большое значение имеет инерционность измерительной аппаратуры.

При образовании элементной стружки происходит последовательный скол отдельных элементов. Следовательно, силы резания изменяются от какого-то минимума до максимума.

Какие же силы фиксировались измерительной аппаратурой, имеющей относительно большую инерционность, которую использовали выше-названные авторы в своих работах, — максимальные, минимальные или какие-то средние, — остается неизвестным. До сего времени остается неясным и характер изменения сил, коэффициента трения и других величин в процессе образования одного элемента. В связи с этим, естественно, возникает мысль провести исследование процесса резания «хрупких» металлов в условиях отсутствия влияния температуры и инерционности аппаратуры.

Одним из таких методов является исследование процесса резания на микроскоростях. Использование микроскоростей значительно облегчает изучение процесса резания и позволяет получить ряд зависимостей, в «чистом» виде, без влияния температуры. Влияние инерционности аппаратуры при этих скоростях очень мало, что позволяет применить более простую и более точную аппаратуру для измерения сил.

Практическое отсутствие износа инструмента обеспечивает получение более точных экспериментальных результатов.

**Методика проведения работы, оборудование и инструмент**

Исследование проводилось на горизонтально-фрезерном станке методом строгания.

Для получения малых скоростей резания стол станка оборудован специальным редуктором, уменьшающим все продольные подачи стола в 60 раз. Измерение сил резания производилось двухкомпонентным упругим динамометром с индуктивными датчиками, который устанавливался с помощью специального основания, на траверзе станка.

Как показали первые опыты, пользование обычными шкальными приборами совершенно исключается ввиду очень больших изменений сил в процессе образования одного элемента.

Поэтому для фиксации их был применен шлейфный осциллограф МПО-2.

Для резания были изготовлены пластинки с размерами  $3 \times 50 \times 70$  мм из ковкого чугуна твердостью 130 Н<sub>В</sub> и серого чугуна твердостью 200 Н<sub>В</sub>.

Быстрорежущие резцы, применявшиеся в опытах, имели передние углы от  $+30^\circ$  до  $-11^\circ$ .

После каждого прохода передняя и задняя грани резца тщательно доводились мелкозернистым брусочком. Толщина среза изменялась от 0,1 до 0,8 мм. Изменение скорости резания производилось в пределах 0,0093—0,76 м/мин.

### Полученные результаты

В результате проведенной работы было получено большое количество кривых записи сил (рис. 1). Эти кривые, с помощью большого про-

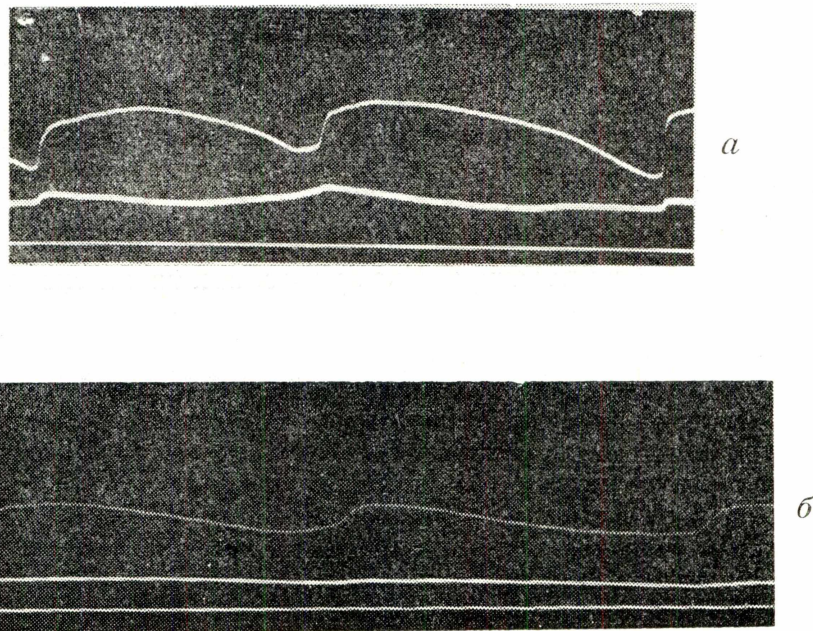


Рис. 1. Осциллограммы сил при резании:  
 а) ковкого чугуна  $V=9$  м/мин.,  $a=0,7$  мм,  
 $i=0^\circ$ , скорость записи 4 мм/сек.  
 б) серого чугуна  $V=9$  м/мин.,  $a=0,5$  мм,  
 $\gamma=+11^\circ$ , скорость записи 10 мм/сек.

эктора типа БП, были обработаны при десятикратном увеличении. На основании полученных данных были построены графики зависимости сил резания от толщины среза, а также графики изменения силы, коэффициента трения и угла  $\phi$  (угла между направлением скорости и равнодействующей на передней грани) по пути образования элемента. На рис. 2 и 3 представлены зависимости сил  $P_{z \max}$  и  $P_{x \max}$  от толщины среза и переднего угла резца для серого и ковкого чугунов при скорости резания  $V=0,0093$  м/мин. Такие же зависимости были получены



и для всех других скоростей резания. Кроме этого, подобные же зависимости были получены и для минимальных значений сил. Так как характер изменения последних не отличается от характера изменения их максимальных значений, в данной статье они не приводятся. При внимательном рассмотрении зависимостей сил от толщины среза можно видеть, что для серого чугуна они для всех передних углов выражаются прямыми линиями, не проходящими через начало координат. Отрезки, отсекаемые этими линиями на оси сил, являются силами на задней грани.

Для ковкого чугуна эти зависимости изображаются прямыми линиями, только до определенной для каждого переднего угла толщины среза, после которой начинается заметное отклонение от прямолинейности.

Как видно из (рис. 3), с уменьшением переднего угла резца прямолинейность данной зависимости улучшается.

Возникает справедливый вопрос, чем объяснить такое различие зависимостей для серого и ковкого чугунов? Основываясь на полученных

данных, можно предположить, что такое расхождение в характере зависимости силы резания от толщины среза кроется в различии пластических свойств этих металлов. Подтверждением этому может

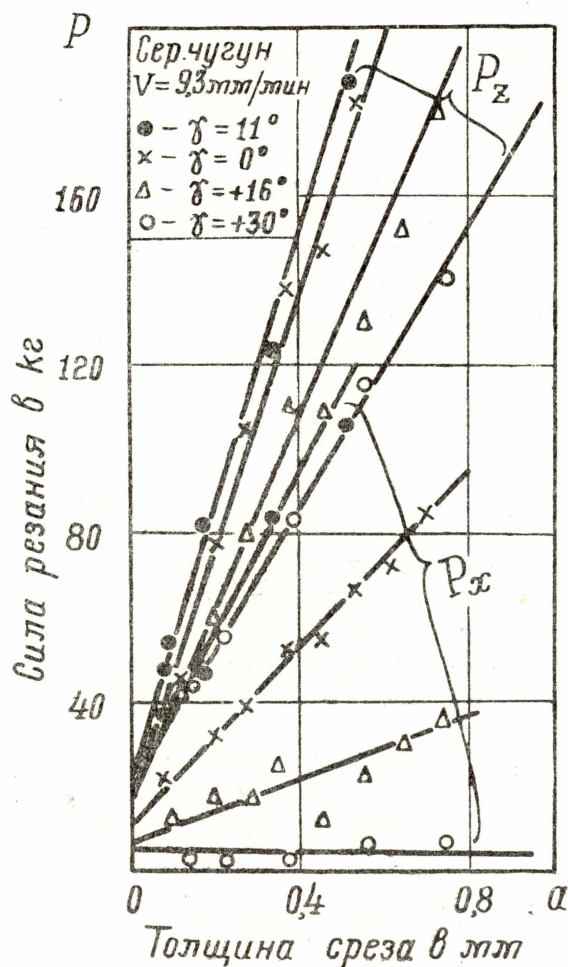


Рис. 2.

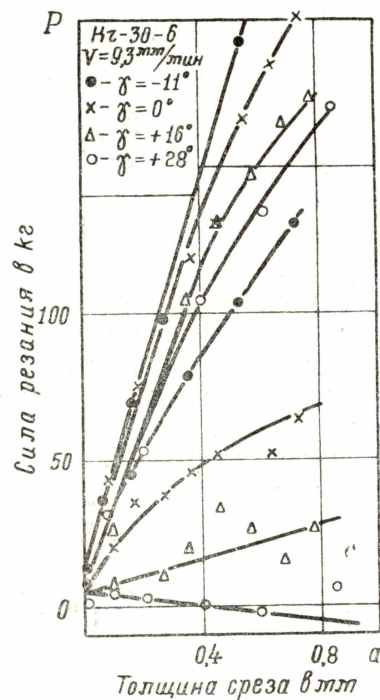


Рис. 3.

быть то, что при резании ковкого чугуна сила резания несколько выше, чем получаемая на сером, несмотря на значительно большую твердость последнего. Опыты по исследованию упрочнения, проведенные методом измерения твердости, показали, что предельное упрочнение серого чугуна не превышает 10%, тогда как для ковкого чугуна оно достигает 40%.

Следствием последнего является различный тип стружки, получаемой при разных толщинах и передних углах.

Анализируя полученную в каждом опыте стружку, авторы заметили, что при резании серого чугуна стружка имеет вид отдельных элементов, мало или совершенно не связанных друг с другом, независимо от переднего угла и толщины среза.

На ковком же чугуне, при малых толщинах и больших передних углах, она сходит сплошной лентой. Эта лента, по мере увеличения толщины, разделяется на отдельные элементы.

С уменьшением переднего угла, разделение стружки на отдельные элементы начинается с меньших толщин. Одновременно с этим было замечено, что с увеличением толщины и уменьшением переднего угла связь между элементами ослабевает и при данном переднем угле, начиная с определенной толщины, совершенно отсутствует.

Каково влияние толщины среза на тип получаемой стружки, пока неизвестно. Увеличение же переднего угла способствует образованию сливной стружки. Эта способность переднего угла резца, как известно, связана со снижением степени пластической деформации срезаемого слоя. Можно предполагать, что при резании хрупких металлов также может быть получена сливная стружка, но при условии получения степени деформации срезаемого слоя ниже предельно допустимой для данного металла. В связи с этим, чем меньше допустимая степень деформации, тем больше должен быть передний угол резца для получения сливной стружки.

Нарушение связи между элементами при резании приводит к тому, что силы в процессе образования одного элемента не остаются постоянными, а непрерывно изменяются от минимума до максимума, соответствующих данной скорости резания, толщине среза и переднего угла.

При детальном анализе полученных данных оказалось, что с изменением скорости резания не только изменяются экстремальные значения сил, но изменяется и их разность, причем чем больше скорость резания, тем меньше данная разность.

Сопоставляя полученные графики «сила резания — толщина среза» для различных скоростей, нетрудно видеть, что с увеличением скорости резания максимальные значения сил возрастают относительно немного, особенно на больших скоростях. Достаточно указать, что для ковкого чугуна при изменении скорости от 0,0093 до 0,76 м/мин угол наклона касательной к кривой для толщины среза 0,5 мм изменяется всего лишь на  $10^\circ$  (от  $43^\circ$  до  $53^\circ$ ), тогда как для минимальных значений силы это изменение измеряется  $25^\circ$  (от  $20^\circ$  до  $45^\circ$ ). Таким образом, с увеличением скорости резания минимальное значение силы все ближе и ближе подходит к максимальному.

Как следует из вышеизложенного, в процессе резания «хрупких» металлов силы не остаются постоянными, а непрерывно изменяются. Причем это изменение, как указывают различные авторы, связано с образованием отдельных элементов.

В этой связи возникает, естественно, желание изучить механизм образования отдельного элемента, выяснить закономерности, имеющиеся при этом, и т. д.

Наибольший интерес представляют силы резания и факторы, на них влияющие. Поэтому авторы попытались, в первую очередь, выяснить, как изменяются силы при образовании одного элемента, как при этом изменяются коэффициент трения  $\mu$  на передней грани резца и угол  $\phi$ .

На рис. 4 показано изменение силы  $P_z$ , коэффициента трения  $\mu$  и угла  $\phi$  по пути образования элемента для ковкого чугуна. Как видно из данного графика, коэффициент трения и угол  $\phi$  изменяются по кри-



вой, имеющей минимум примерно на середине пути, однако сила  $P_z$  при этом изменяется по кривой, имеющей максимум. Кроме того, график показывает, что максимальное значение силы не совпадает с минимальными значениями угла  $\phi$  и  $\rho$ .

Вышеприведенный график также показывает, что рост силы в начальный момент образования элемента идет значительно быстрее, чем в конечный. Это же можно видеть и на осциллограмме (рис. 1, а), полученной при скорости резания  $V=0,0093$  м/мин, толщине среза  $a=0,7$  мм и переднем угле резца  $\gamma = 0^\circ$ .

Приведенные данные, на первый взгляд, кажутся несколько необычными. И действительно, там, где коэффициент трения уменьшается, сила

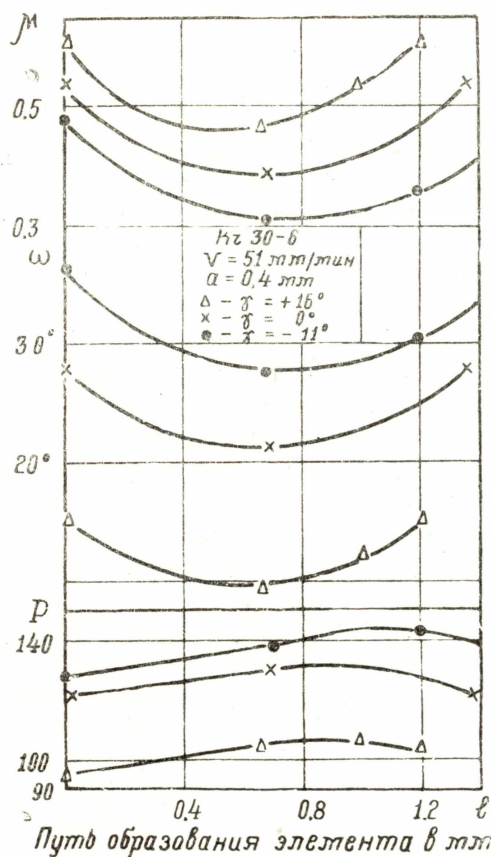


Рис. 4.

достаточно быстро растет, и, наоборот, там, где коэффициент трения возрастает, рост силы значительно замедляется, а в конце пути элемента ее величина даже снижается.

Расчет равнодействующей  $R$  сил на передней грани для данных случаев (табл. 1) также показывает, что ее изменение аналогично изменению силы  $P_z$ .

Тщательный анализ полученных данных показывает, что при данной геометрии инструмента на силу резания при образовании одного элемента оказывают влияние следующие факторы:

1. Переменность толщины среза.
2. Коэффициент трения на передней грани.
3. Упрочнение металла.

Как велико влияние каждого из этих факторов, пока ответить невозможно.

В настоящее время можно лишь предполагать, что по мере дви-

Таблица 1

$\gamma+16^\circ$		$\gamma=0^\circ$		$\gamma=-11^\circ$	
$a=0,4$	$a=0,6$	$a=0,4$	$a=0,6$	$a=0,4$	$a=0,6$
101	137	139,5	99,7	159	181
107	144	141	143	157,5	194
111	152	139	163	169	209
108	141		169	168	213
			165		210
			151		173
			79		

жения резца (рис. 5) увеличение толщины среза, получающееся при этом, вызывает увеличение силы резания. Однако это увеличение не может быть пропорциональным толщине среза в силу, с одной стороны, уменьшения коэффициента трения, а с другой — возрастания степени деформации элемента. Рассуждения, касающиеся закономерностей, имеющих место при образовании одного элемента, в основном относятся к результатам, полученным на ковком чугуна, тем не менее, как можно видеть из рис. 6, и при резании серого чугуна подобные зависимости имеют место, хотя и менее выраженные. Одновременно с этим в процессе исследования авторами была проведена проверка формулы, связывающей касательные напряжения с твердостью и для ковкого чугуна.

Как известно, эта связь, установленная в лаборатории резания Томского политехнического института [13], значительно упрощает и ускоряет расчет касательных напряжений, а следовательно, и сил при резании металлов.

Для расчета касательных напряжений по этой формуле достаточно знать твердость срезанной стружки, т. е. достаточно установить то упрочнение, которое получила стружка в процессе деформации.

В связи с этим для серого чугуна, как металла предельно-упрочняющегося и имеющего очень низкий процент упрочнения (не выше 10%), оказалось возможным вести расчет напряжений не по твердости стружки, а непосредственно по твердости исходного металла [4].

Однако для ковкого чугуна, как металла тоже обладающего предельным упрочнением, последняя формула непригодна, так как она дает результаты ниже действительных на 30—50%. Анализ показывает, что это занижение связано с тем, что при одинаковой твердости ковкий чугун имеет значительно больший процент упрочнения (до 50%), чем серый, т. е. ковкий чугун обладает значительной по сравнению с серым чугуном пластичностью. Измерение твердости стружки показывает, что она остается при всех исследованных режимах резания постоянной, причем величина этой твердости больше твердости исходного металла на коэффициент упрочнения (под коэффициентом упрочнения понимается отношение твердости деформированного до разрушения образца к исходной твердости данного образца). Данное положение создает возможность и при резании ковкого чугуна вести расчет касательных напряжений не по твердости стружки, а по исходной твердости металла, но с учетом коэффициента упрочнения. В этом случае формула будет иметь вид:

$$\tau = 0,185 \cdot C \cdot H_B \text{ кг/мм},$$

где  $C$  — коэффициент упрочнения,  
 $H_B$  — исходная твердость чугуна по Бринеллю.



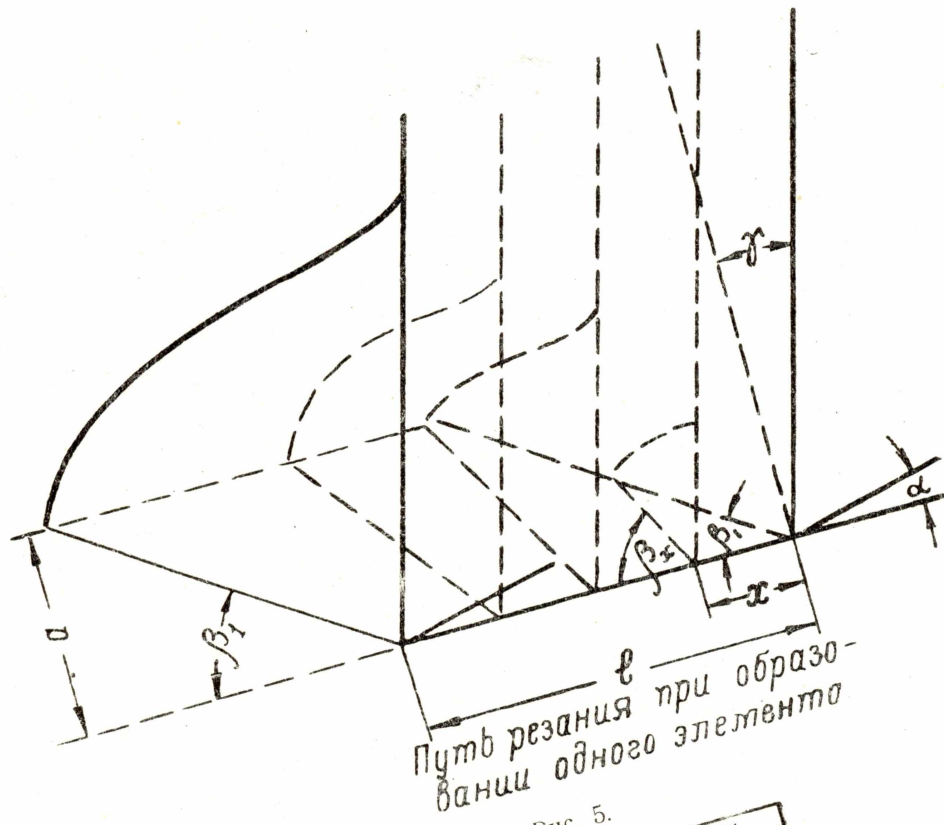
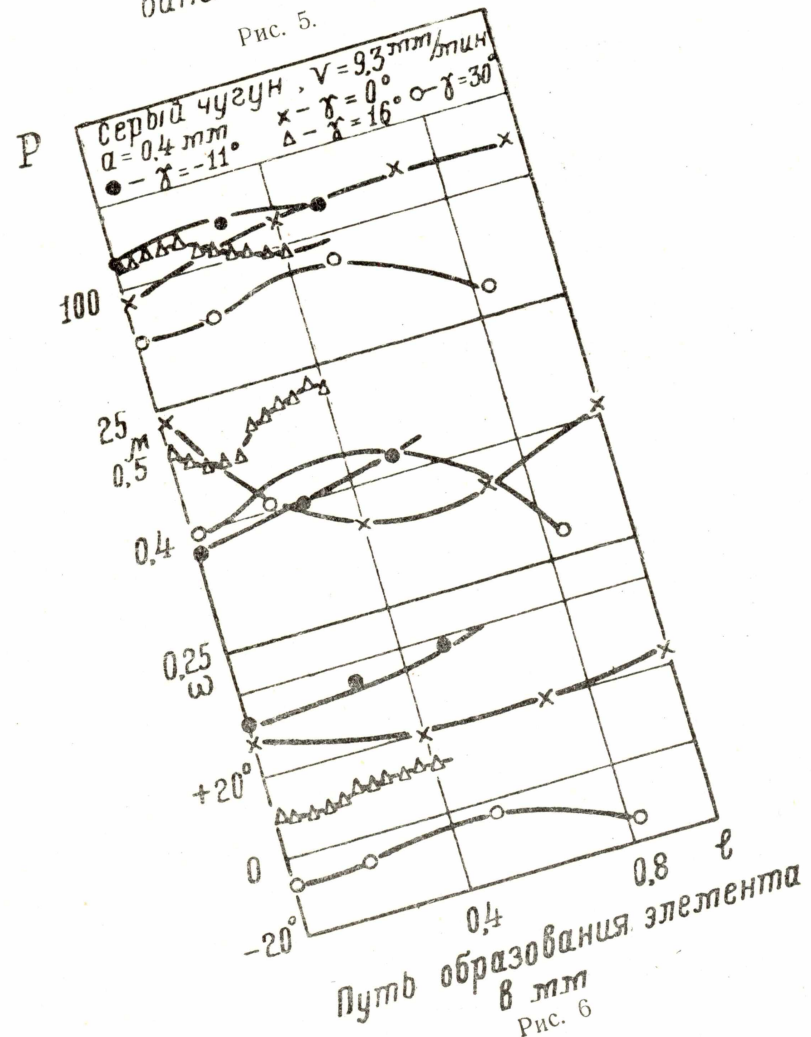


Рис. 5.



Проверка данной формулы показывает, что результаты, полученные по ней, очень близки к действительным. Например, для ковкого чугуна, имеющего исходную твердость  $H_B = 140$  и предельное упрочнение 40%, данная формула дает  $\tau = 36,2 \text{ кг/мм}^2$ . При резании касательные напряжения имеют величину  $\tau = 35 \text{ кг/мм}^2$ . Данная формула оказывается справедлива и для серого чугуна, причем величина напряжения получается ближе к действительной.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тиме И. А. Сопротивление металлов и дерева резанию. Горный журнал, 1871.
2. Зворыкин К. А. Работа и усиление, необходимые для отделения металлической стружки. Москва, 1893.
3. Усачев Я. Г. Явления, происходящие при резании металлов. Известия СПб, политехнический институт, т. XXIII, в. 1, 1915.
4. Глебов С. Ф. Теория наиболее выгоднейшего резания металлов, Книга первая, Законы резания, ОНТИ, 1933.
5. Беспрозванный И. М. Основы теории резания металлов, Машгиз, 1948.
6. Розенберг А. М. Динамика фрезерования. Советская наука, 1945.
7. Даниелян А. М. Динамика фрезерования, ОНТИ, 1936.
8. Кривоухов В. А. Резание металлов, ОНТИ, 1938.
9. Айзеншток И. Я. Основные вопросы механики процесса резания металлов. Машгиз, 1950.
10. Клушин М. И. Резание металлов, Машгиз, 1958.
11. Зорев Н. Н. Исследование элементов механики процесса резания, Машгиз, 1952.
12. Розенберг Ю. А. Исследование процесса резания серого чугуна. Автореферат, Томск, 1952.
13. Розенберг А. М., Еремин А. Н. Элементы теории процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
14. Розенберг Ю. А., Седоков Л. М. О расчете силы резания при точении и фрезеровании серого чугуна. Вестник машиностроения, № 12, 1957.