

УДК 621.91

В.П. Маршуба, канд. тех. наук, И.Б. Плахотникова  
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА СИЛУ РЕЗАНИЯ ПРИ ГЛУБОКОМ СВЕРЛЕНИИ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВ СТАНДАРТНЫМИ СВЕРЛАМИ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ**

*Исследовано влияние режимов резания на силу резания при глубоком безвыводном сверлении литейных алюминиевых сплавов на агрегатных станках. На основе полученных закономерностей изменения силы резания, разработаны и уточнены поправочные коэффициенты и показатели степени к формулам по определению осевой составляющей силы резания и крутящего момента. Использование этих закономерностей позволит определять необходимые режимы резания при максимальной производительности при обработке деталей из указанных сплавов.*

**Введение.** Сверление глубоких отверстий в литейных алюминиях зачастую является наиболее продолжительной операцией технологического процесса при обработке деталей в машиностроении. Следовательно, при проектировании оборудования заказчик, естественно, настаивает на применении стандартного инструмента и предельно допустимых режимов резания при обработке глубоких отверстий. Вызвано это желанием упростить условия эксплуатации оборудования и сокращением основного времени, затраченного на выполнение таких операций. Однако в процессе эксплуатации оборудования выясняется, что такое решение является не лучшим из-за возникающих трудностей при работе режущего инструмента в процессе глубокого безвыводного сверления отверстий.

Поэтому в процессе эксплуатации такого оборудования возникает необходимость снижать скорость резания в 2...3 раза по сравнению со скоростью

резания при обработке неглубоких отверстий, из-за неудовлетворительной стойкости стандартных спиральных сверл и частых случаев внезапного отказа инструмента [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Данные по влиянию режимов резания на осевую составляющую  $P_O$  и крутящий момент  $M_{кр}$  при глубоком безвыводном сверлении литейных алюминиев на агрегатных станках в технической литературе отсутствуют либо неполны [2, 3]. Поэтому для повышения эффективности глубокого безвыводного сверления отверстий в литейных алюминиях необходимо выяснить влияние режимов резания на силу резания, т.е. определить зависимость влияния скорости резания, диаметра сверла и подачи на осевую составляющую  $P_O$  и крутящий момент  $M_{кр}$ .

Из данных технической литературы [2, 3] известно, что скорость резания на силы резания влияет в избранном интервале от 20 до 40 м/мин при обработке сталей очень незначительно, тогда как для алюминия эта зависимость не установлена, поэтому её необходимо уточнить.

Влияние диаметра стандартного спирального сверла и подачи на силы резания, в работах [2, 3], учитывается в формулах по определению осевой составляющей силы резания ( $P_O$ ) и крутящего момента ( $M_{кр}$ ):

$$P_O = C_{P_O} D^{X_{P_O}} S^{Y_{P_O}} K; \quad (1)$$

$$M_{кр} = C_{M_{кр}} D^{X_{M_{кр}}} S^{Y_{M_{кр}}} K, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от условий обработки литейных алюминиев, который определяется по формуле:

$$K = K_{MV} K_{IV} K_{ПV}, \quad (3)$$

где  $K_{MV}$ ,  $K_{IV}$ ,  $K_{ПV}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние соответствующих физико-механических свойств: обрабатываемого материала (см. табл. 1); инструментального материала (см. табл. 2); состояние поверхности заготовки,  $K_{ПV} = 0,9$ .

**Цель исследований** – установление закономерностей изменения силы резания при глубоком безвыводном сверлении литейных алюминиевых сплавов

на агрегатных станках. На основе найденных закономерностей изменения силы резания уточнить поправочные коэффициенты и показатели степени к формулам по определению осевой составляющей силы резания и крутящего момента, разработать научно-обоснованные рекомендации по выбору режимов резания применительно к производству деталей из этих сплавов.

**Изложение основного материала.** При анализе данных, полученных в ходе проведения экспериментов, автором установлены поправочные коэффициенты, значения которых определены опытным путем (см. табл. 1 и 2).

Таблица 1

Поправочный коэффициент  $K_{MV}$

Обрабатываемый материал	Физические параметры обрабатываемого материала	Поправочный коэффициент $K_{MV}$
Литейные алюминиевые сплавы	$\delta_B=100\dots200$ МПа, $HB\leq 65$	0,8
	$\delta_B=200\dots300$ МПа, $HB\leq 100$	1,0

Таблица 2

Поправочный коэффициент  $K_{IV}$

Материал	Марки стали и износостойкого покрытия	Поправочный коэффициент $K_{IV}$
Быстрорежущая инструментальная сталь	P6M5	1,0
	P6M5Ф3	1,1
	P6M5+TiN	1,3
	P6M5Ф3+TiN	1,4

Из двух переменных параметров (D и S) формул 1 и 2 по определению осевой составляющей силы резания ( $P_O$ ) и крутящего момента ( $M_{KR}$ ) в зависимости от силы резания, по данным проведенного исследования, установлено, что диаметр сверла и подача на силу резания оказывают неодинаковое влияние, что подтверждается работами [4-7]. Связано это с тем, что при сверлении толщина срезаемого слоя (а), характеризующая влияние подачи на осевую составляющую силы  $P_O$  и крутящий момент  $M_{KR}$ , влияет в 2...3 раза меньше, чем ширина срезаемого слоя (в), характеризующая влияние диаметра сверла. Однако, если подача (S) влияет на  $P_O$  и  $M_{KR}$  примерно одинаково, то диаметр сверла (D)

влияет на крутящий момент больше, чем на осевую составляющую силы. Последнее объясняется тем, что при увеличении диаметра инструмента возрастает ширина среза, следовательно, увеличивается плечо, на котором эти силы действуют. Отсюда следует, что ширина срезаемого слоя ( $\delta$ ) или диаметр сверла действуют на крутящий момент  $M_{кр}$  в 2...3 раза больше, чем на осевую составляющую  $P_o$ , тогда как влияние ширины среза на силу резания больше в десятки раз, чем такое же влияние толщины среза.

Эксперименты по определению влияния режимов резания на силу резания при глубоком безвыводном сверлении литейных алюминиевых сплавов разбили на три части из-за различия в переменных значениях (определяли влияние скорости резания, диаметра сверла и подачи) и проводили по стандартной методике. Опыты выполняли на вертикально-сверлильном станке мод. 2С132 Стерлитамакского станкостроительного завода и агрегатно-сверлильном станке мод. АМ16239 Минского завода автоматических линий.

**Влияние скорости резания.** Опыты проводились при постоянном значении подачи ( $S=0,26$  мм/об) для сравнительно узкого диапазона диаметров сверл (от 8 до 15 мм), путем изменения частоты вращения инструмента. Достигалось это путем замены электродвигателя и шестерен в цепи передачи главного движения на агрегатном станке или переключением частоты вращения шпинделя на вертикально-сверлильном станке. Выбор столь узкого диапазона диаметров инструмента обосновывается только требованиями жесткости в системе деталь – режущий инструмент – станок, с одной стороны, с другой – в данной работе рассматривается только глубокое безвыводное сверление отверстий малого диаметра (до 15 мм).

Влияние скорости резания на силу резания определяли через изменение влияния частоты вращения на осевую составляющую силы резания ( $P_o$ ) и крутящий момент ( $M_{кр}$ ), следовательно, эту серию опытов проводили с разными скоростями резания ( $V=22,6; 28,3; 31,65; 33,9 39,6$  м/мин).

Результаты и рассчитанные в ходе анализа данные, полученные в ходе проведения серии опытов, даны на рис. 1 (а и б) и табл. 3.

На рис. 1 (а и б) видно, что с увеличением скорости резания в избранном интервале значения как осевой составляющей силы резания ( $P_O$ ), так и крутящего момента ( $M_{кр}$ ) пропорционально уменьшается. Связано это с тем, что при увеличении скорости резания в избранном интервале на режущих кромках сверла идет активный процесс возникновения, роста и срыва наростов, следовательно, увеличивается угол заострения  $\beta$  и, как результат этого, уменьшается сила резания.

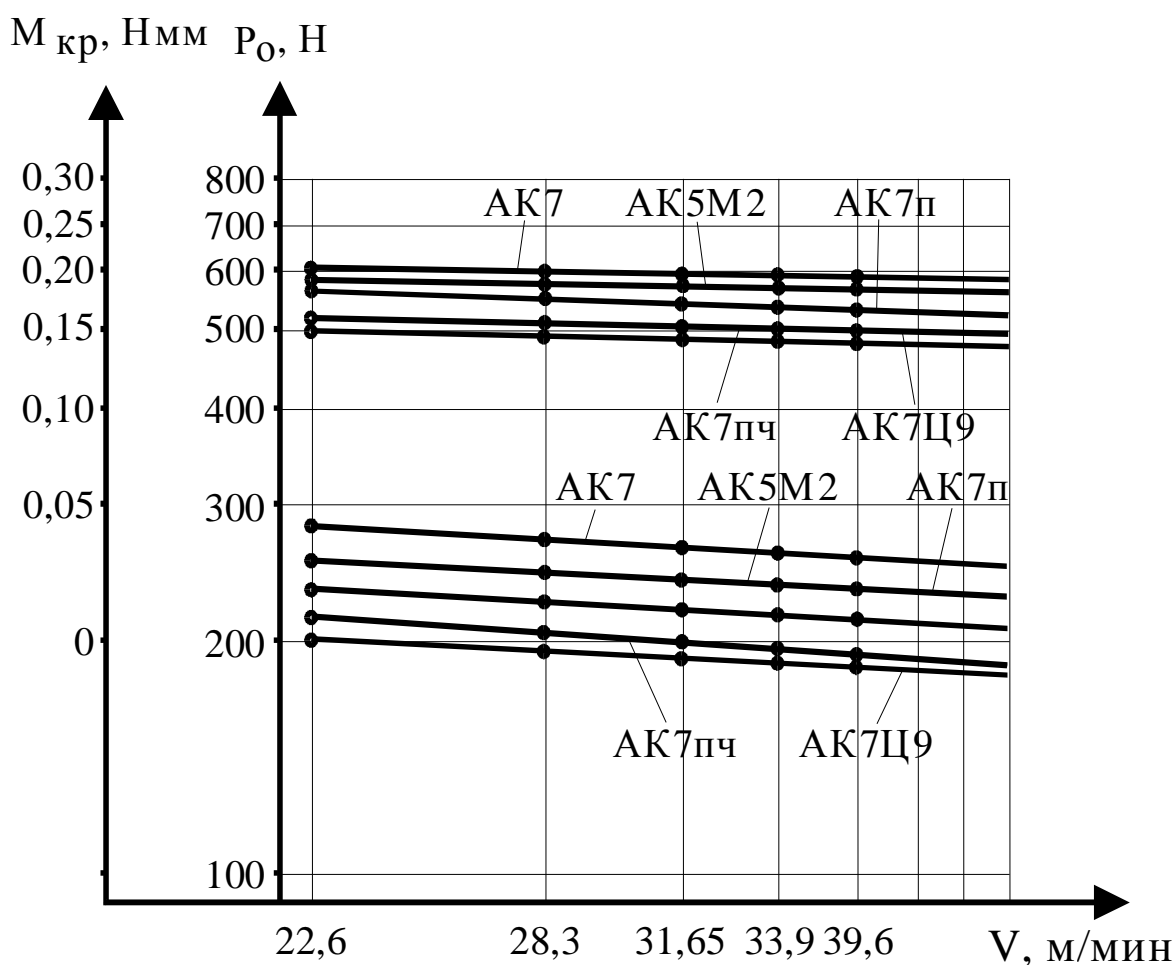


Рис. 1 – Влияние скорости резания на осевую составляющую силы резания  $P_O$  (внизу (а)) и крутящий момент  $M_{кр}$  (вверху (б)).

Разброс значений между испытываемыми образцами связан с различной микроструктурой сплавов, т.е. наличием в структуре сплавов различных легирующих элементов и примесей, погрешностями измерений показаний прибо-

ров. В целом результаты согласовываются с известными данными по влиянию скорости резания  $V$  на  $P_O$  и  $M_{кр}$  и отличаются от них не более чем на 10%. Следовательно, более детальное изучение влияния скорости резания  $V$  на  $P_O$  и  $M_{кр}$  не нужно, так как наметившаяся тенденция при определении зависимости совпадает с данными других авторов для диапазона скоростей от 20 до 50 м/мин и хорошо описывается уравнениями частной зависимости:

$$P_O = C_{1P_O} V^{Z_{P_O}} K \quad (4)$$

$$M_{кр} = C_{1M_{кр}} V^{Z_{M_{кр}}} K \quad (5)$$

где  $Z_{P_O}$  и  $Z_{M_{кр}}$  – показатели степени (см. табл. 3);  $C_{1P_O}$  и  $C_{1M_{кр}}$  – постоянные коэффициенты (см. табл. 3).

Таблица 3

Показатели степени и постоянные коэффициенты к формулам (4) и (5).

Марка сплава	Осевая составляющая силы резания ( $P_O$ ), Н		Крутящий момент ( $M_{кр}$ ), Нмм	
	$C_{1P_O}$	$Z_{P_O}$	$C_{1M_{кр}}$	$Z_{M_{кр}}$
АК7, образец №1	21,9	0,061	17,1	0,018
АК7п, образец №2	17,9	0,061	15,0	0,026
АК7пч, образец №3	15,9	0,069	15,2	0,034
АК5М2, образец №4	19,0	0,052	16,9	0,018
АК7Ц9, образец №5	15,9	0,052	11,9	0,026
$\Sigma$	18,1	0,059	15,2	0,024

**Влияние диаметра сверла.** Опыты выполнялись при постоянных значениях подачи ( $S=0,26$  мм/об) и частоты вращения инструмента ( $n=890$  об/мин), для сравнительно узкого диапазона диаметров сверл от 8 до 15 мм, путем замены сверл с различными диаметрами (8; 10; 11,2; 12 и 14 мм).

По результатам проведенных экспериментов выполнен анализ опытных данных, которые представили в виде рис. 2 (а и б) и табл. 4.

На рис. 2 (а и б) видно, что с увеличением диаметра инструмента в избранном интервале значений, как осевой составляющей силы резания ( $P_O$ ), так и крутящего момента ( $M_{кр}$ ) увеличиваются прямо пропорционально. Связано это с тем, что при увеличении диаметра сверла в избранном интервале увеличи-

вается ширина срезаемого слоя ( $e$ ), следовательно, диаметр инструмента влияет на рост силы резания прямо пропорционально. Однако следует отметить, что влияние диаметра сверла на  $P_O$  и  $M_{кр}$  различно. Так, прирост величины крутящего момента в 2...3 раза больше, чем такой же рост осевой составляющей силы резания  $P_O$ , это объясняется тем, что из-за увеличения ширины среза возрастает плечо, на котором эти силы действуют.

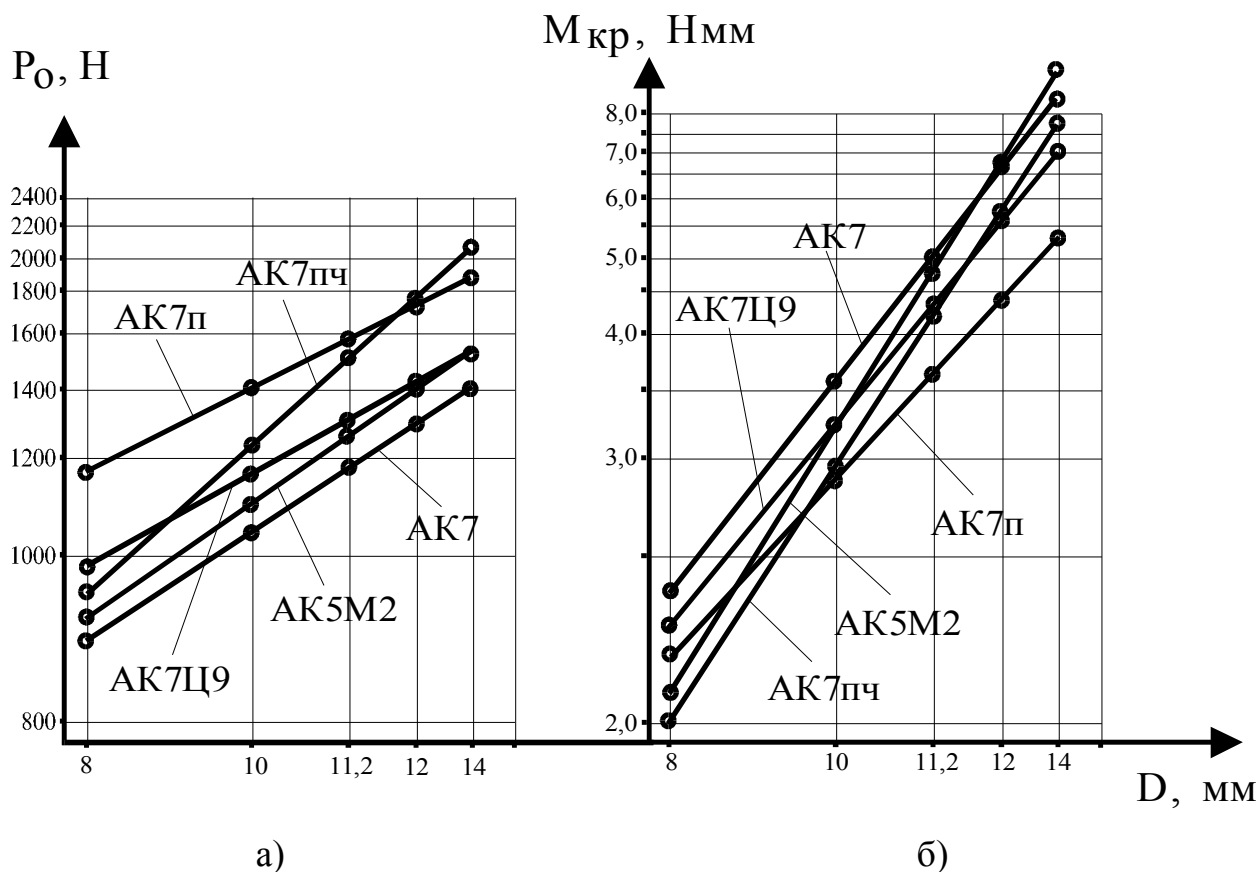


Рис. 2 – Влияние диаметра стандартного спирального сверла на осевую составляющую силы резания (а) и крутящий момент (б).

Разброс значений между испытываемыми образцами связан с различной микроструктурой сплава, т.е. наличием в структуре сплавов различных легирующих элементов и примесей, погрешностями измерений показаний приборов. В целом результаты согласовываются с известными данными о тенденции влияния диаметра сверла на  $P_O$  и  $M_{кр}$ , различны только числовые данные. Следовательно, не стоит более детально изучать влияние диаметра сверла на  $P_O$  и  $M_{кр}$ ,

так как наметившаяся тенденция при определении зависимости совпадает с данными других авторов для избранного интервала значений диаметров сверла и хорошо описывается уравнениями частной зависимости:

$$P_O = C_{2P_O} D^{X_{P_O}} K; \quad (6)$$

$$M_{КР} = C_{2M_{КР}} D^{X_{M_{КР}}} K, \quad (7)$$

где  $X_{P_O}$  и  $X_{M_{КР}}$  – показатели степени (см. табл. 4);  $C_{2P_O}$  и  $C_{2M_{КР}}$  – постоянные коэффициенты (см. табл. 4).

Таблица 4

Показатели степени и постоянные коэффициенты к формулам (6) и (7).

Марка сплава	Осевая составляющая силы резания ( $P_O$ ), Н		Крутящий момент ( $M_{КР}$ ), Нмм	
	$C_{1P_O}$	$Z_{P_O}$	$C_{1M_{КР}}$	$Z_{M_{КР}}$
AK7, образец №1	22,7	0,69	20,8	1,32
AK7п, образец №2	40,1	0,57	20,3	1,19
AK7пч, образец №3	16,3	0,93	10,2	1,54
AK5M2, образец №4	21,5	0,75	10,4	1,60
AK7Ц9, образец №5	27,3	0,66	19,9	1,28
$\Sigma$	25,6	0,72	16,3	1,39

**Влияние подачи.** Опыты по определению влияния подачи на силу резания проводились при постоянном диаметре сверла ( $D = 14$  мм) и скорости резания ( $V = 31,65$  м/мин). Значения подач выбирались исходя из конструктивных возможностей вертикально-сверлильного станка мод. 2С132 и возможностей агрегатного станка в пределах ( $S=0,1; 0,14; 0,2; 0,28; 0,4; 0,56; 0,8$  и  $1,12$  мм/об).

Закономерности влияния подачи на силу резания определяли путем измерения значений осевой составляющей силы резания  $P_O$  и крутящего момента  $M_{КР}$ , при изменении значений подач, выбранных по конструктивным параметрам станка.

По результатам проведенных экспериментов выполнен анализ опытных данных, которые представили в виде рис. 3 (а и б) и табл. 5.

На рис. 3 (а и б) видно, что с изменением значений подач в избранном интервале пропорционально увеличивается как осевая составляющая силы реза-

ния ( $P_O$ ), так и крутящий момент ( $M_{кр}$ ). Связано это с тем, что при изменении значений подач увеличивается толщина срезаемого слоя, следовательно, подача влияет на рост силы резания прямо пропорционально. При этом следует отметить, что влияние значений подач режущего инструмента на  $P_O$  и  $M_{кр}$  примерно одинаково. Разброс значений между испытываемыми образцами связан с различной микроструктурой сплавов, т.е. наличием в структуре сплавов различных легирующих элементов и примесей, погрешностями измерений показаний приборов. В целом результаты согласовываются с известными данными по влиянию подачи  $S$  на силу резания и отличаются от них не более чем на 10%.

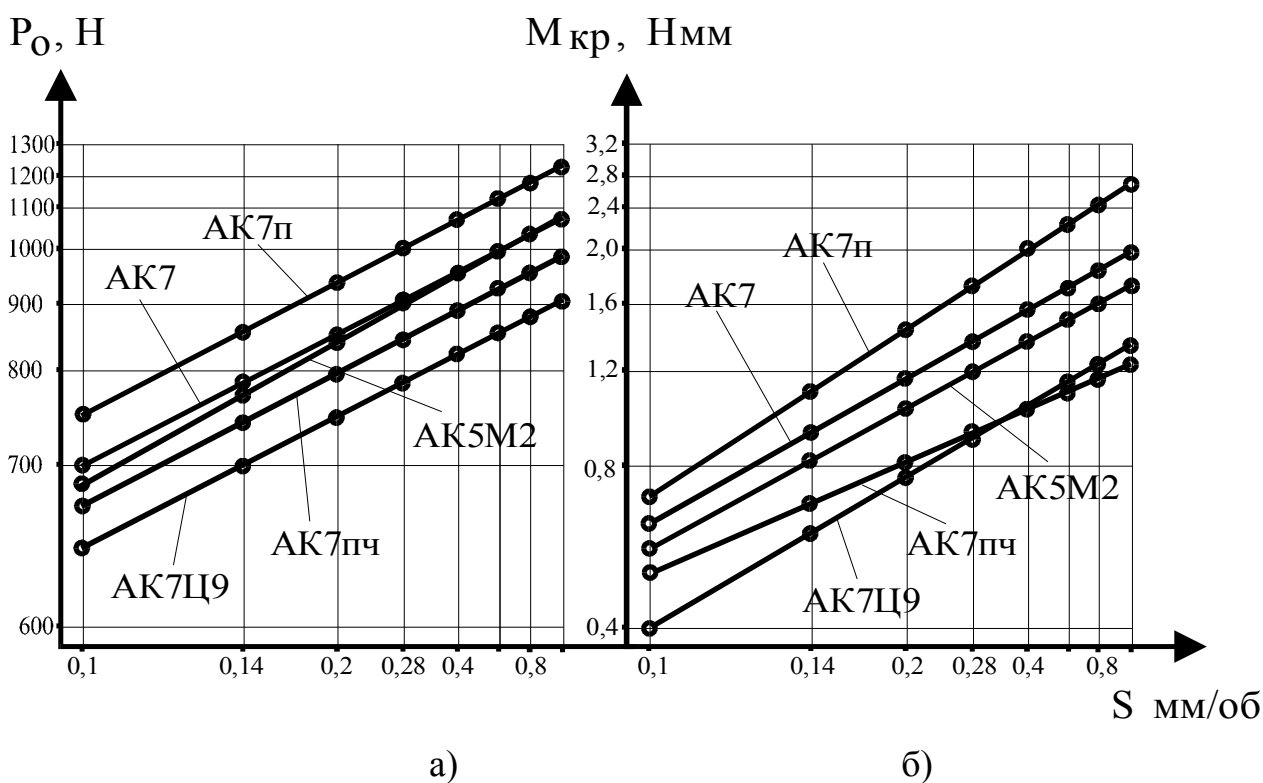


Рис. 3 – Влияние подачи режущего инструмента на осевую составляющую силы резания (а) и крутящий момент (б).

Следовательно, более детальное изучение влияния подачи  $S$  на  $P_O$  и  $M_{кр}$  не имеет необходимости, так как наметившаяся тенденция при определении зависимости полностью совпадает с известными данными других авторов и хорошо описывается уравнениями частной зависимости:

$$P_O = C_{3P_0} S^{Y_{P_0}} K; \quad (8)$$

$$M_{KP} = C_{3M_{KP}} S^{Y_{M_{KP}}} K, \quad (9)$$

где  $Y_{P_0}$  и  $Y_{M_{KP}}$  – показатели степени (см. табл. 5);  $C_{3P_0}$  и  $C_{3M_{KP}}$  – постоянные коэффициенты (см. табл. 5);

Таблица 5

Показатели степени и постоянные коэффициенты в формулах (8) и (9).

Марка сплава	Осевая составляющая силы резания ( $P_O$ ), Н		Крутящий момент ( $M_{KP}$ ), Нмм	
	$C_{1P_0}$	$Z_{P_0}$	$C_{1M_{KP}}$	$Z_{M_{KP}}$
AK7, образец №1	19,4	0,60	26,9	0,67
AK7п, образец №2	20,5	0,61	18,3	0,58
AK7пч, образец №3	20,0	0,69	19,2	0,64
AK5M2, образец №4	20,9	0,67	35,4	0,73
AK7Ц9, образец №5	16,2	0,60	22,9	0,65
$\Sigma$	19,4	0,63	24,5	0,65

**Обобщенное влияние режимов резания на силу резания.** Для обобщения зависимости силы резания от режимов резания, выражающих влияние зависимых переменных  $P_O$  и  $M_{KP}$  от факторов  $V$ ,  $D$  и  $S$ , значения постоянных коэффициентов и показателей степени в уравнениях (4), (5), (6), (7), (8) и (9) объединим:

$$P_O = C_{1P_0} V^{Z_{P_0}} K$$

$$M_{KP} = C_{1M_{KP}} V^{Z_{M_{KP}}} K$$

$$P_O = C_{2P_0} D^{X_{P_0}} K$$

$$M_{KP} = C_{2M_{KP}} D^{X_{M_{KP}}} K$$

$$P_O = C_{3P_0} S^{Y_{P_0}} K$$

$$M_{KP} = C_{3M_{KP}} S^{Y_{M_{KP}}} K$$

Первая серия опытов выполнена при постоянном диаметре стандартного спирального сверла  $D = D_{const}$  и подаче  $S = S_{const}$ , вторая – при постоянной скорости резания  $V = V_{const}$  и подачи  $S = S_{const}$ , третья – при постоянной скорости резания  $V = V_{const}$  и диаметре сверла  $D = D_{const}$ .

Полученные в ходе анализа опытных данных обобщенные зависимости сведены в табл. 6, отсюда обобщенное уравнение зависимости осевой состав-

ляющей силы резания силы и крутящего момента от режимов резания при обработке ЛАС имеет вид:

$$P_O = \frac{C_{P_0} D^{X_{P_0}} S^{Y_{P_0}}}{V^{Z_{P_0}}} K; \quad (10)$$

$$M_{\text{кр}} = \frac{C_{M_{\text{кр}}} D^{X_{M_{\text{кр}}}} S^{Y_{M_{\text{кр}}}}}{V^{Z_{M_{\text{кр}}}}} K, \quad (11)$$

где  $C_{P_0}$  и  $C_{M_{\text{кр}}}$  – обобщенные постоянные коэффициенты, см. табл. 6.

Таблица 6

Обобщенные показатели степени и постоянные коэффициенты к формулам по определению осевой составляющей (10) и крутящего момента (11).

Марка сплава	Осевая составляющая $P_O$ , Н				Крутящий момент $M_{\text{кр}}$ , Нмм			
	$C_{P_0}$	$X_{P_0}$	$Y_{P_0}$	$Z_{M_{\text{кр}}}$	$C_{M_{\text{кр}}}$	$X_{M_{\text{кр}}}$	$Y_{M_{\text{кр}}}$	$Z_{M_{\text{кр}}}$
АК7	21,4	0,69	0,60	0,061	21,6	1,32	0,67	0,018
АК7н	26,2	0,57	0,61	0,061	17,8	1,19	0,58	0,026
АК7нч	17,4	0,93	0,69	0,069	14,9	1,54	0,64	0,034
АК5М2	20,5	0,75	0,67	0,052	20,9	1,60	0,73	0,018
АК7Ц9	19,8	0,66	0,60	0,052	18,2	1,28	0,65	0,026
$\Sigma$	21,0	0,72	0,63	0,059	18,7	1,39	0,65	0,024

**Выводы.** На основе проведенных экспериментов и анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. При проведении экспериментов получены основные закономерности изменения осевой составляющей силы резания ( $P_O$ ) и крутящего момента ( $M_{\text{кр}}$ ) в зависимости от трех изменяемых параметров (скорости резания, диаметра режущего инструмента и подачи) при глубоком безвыводном сверлении отверстий (глубиной до 10...15d) в литейных алюминиевых сплавах.

2. На основе установленных в ходе опытов зависимостей найдены поправочные коэффициенты и показатели степени к формулам по определению силы резания и крутящего момента в зависимости от переменного фактора (скорости резания, диаметра режущего инструмента и подачи) применительно к обработке глубоких отверстий в литейных алюминиях.

3. На основании зависимостей выполнено обобщение влияния скорости резания, диаметра режущего инструмента и подачи на силу резания, что позволило найти поправочные коэффициенты и показатели степени к формулам по определению  $P_O$  и  $M_{кр}$ .

4. Полученные результаты позволяют определять оптимальные режимы резания, которые возможно использовать при проектировании нового оборудования или технологических процессов обработки глубоких отверстий в деталях из литейных алюминия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Дрожжин В.И., Маршуба В.П.* Эффективность глубокого сверления алюминия многошпиндельными разно инструментальными головками на агрегатных станках и автоматических линиях. // “Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг”: Труды VII Междунар. науч.-техн. семинара 24-28 сентября 1998 г. в г. Харькове. – Харьков: ХДПУ, 1998. – С. 198-201.
2. *Справочник технолога-машиностроителя.* В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. 656 с.
3. *Грановский Г.И., Грановский В.Г.* Резание металлов. – М.: Высш. школа, 1985.-304 с.
4. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975.– 344 с.
5. *Зорев Н.Н.* Расчет проекцией силы резания. – М.: Машгиз, 1958. – 88 с.
6. *Обработка металлов резанием: Справочник технолога.* / Под ред. А.А. Панаева и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 736 с.
7. *Резников Н.И.* Учение о резании металлов. – М.: Машгиз, 1947. – 586 с.