

УДК 621.91.02

Г.Б. БАГДАСАРЯН, М.Е. АРУТЮНЯН, В.Г. БАГДАСАРЯН
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ПРОЦЕССЕ ЛЕЗВИЙНОГО РЕЗАНИЯ

Рассмотрены вопросы влияния режимов резания на формирование технологических остаточных напряжений в приповерхностном слое после лезвийной обработки. Проведен краткий анализ результатов исследований, даны рекомендации по назначению режимов резания, при которых в поверхностном слое накапливаются сжимающие остаточные напряжения.

Ключевые слова: лезвийное резание, режимы резания, остаточные напряжения, температура резания.

Введение. Процесс перемещения режущего клина инструмента в обрабатываемом материале представляет собой сложный комплекс физико-механических явлений, и сьем материала сопровождается его интенсивными упругой и пластической деформациями в области резания [1]. Этот неизбежный при стружкообразовании процесс создает предпосылки для возникновения остаточных напряжений [2]. Окончательные параметры качества поверхностных слоев деталей машин формируются под влиянием суммарного воздействия и степени воздействия каждого из всех технологических факторов. В итоге при точении на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое оказывают влияние режимы резания.

Исходя из вышеизложенного, целью исследования является изучение взаимосвязи остаточных напряжений в зависимости от режимов резания.

Методика исследования. Эксперименты проводились при точении всухую заготовок из широко применяемых в машиностроении стали 45, стали 40Х, стали 35ХГСА и латуни ЛС62, которые были выбраны с учетом их различных механических свойств и обрабатываемостей.

Для исключения влияния посторонних факторов на образование поверхности детали применен токарно-винторезный станок марки 16К20Ф3, имеющий жесткую технологическую систему.

Многочисленными исследованиями доказана очевидная связь между маркой режущей пластинки и технологическими характеристиками. Неправильный выбор марки режущих пластинок способствует увеличению доли пласти-

ческой деформации, что ухудшает состояние поверхностного слоя обработанной поверхности, где накапливаются остаточные напряжения. Следовательно, для сведения к минимальным значениям технологических остаточных напряжений в зависимости от режущей пластинки выбор марки пластин необходимо производить в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемых материалов. В качестве режущего материала, согласно рекомендациям [3], как самый оптимальный вариант, применен резец, оснащенный режущей пластинкой марки T15K6.

В исследованиях из общего числа факторов, влияющих на процесс резания, исключено влияние геометрических параметров резца с применением резца наименьшего сопротивления, геометрия которого (φ – главный угол в плане, α – задний и γ – передний углы) методом плоскости наименьшего сопротивления [4] определена в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала:

- для стали 45 – $\varphi=83^{\circ}$, $\gamma=25^{\circ}$, $\alpha=10^{\circ}$;
- для стали 40Х – $\varphi=86^{\circ}$, $\gamma=20^{\circ}$, $\alpha=12^{\circ}$;
- для стали 35ХГСА – $\varphi=85^{\circ}$, $\gamma=17^{\circ}$, $\alpha=10^{\circ}$;
- для латуни ЛС62 – $\varphi=88^{\circ}$, $\gamma=30^{\circ}$, $\alpha=8^{\circ}$.

Определение величины технологических остаточных напряжений проведено согласно методу Н.Н. Давиденкова.

За основу методики проведения опытов принята теория многофакторного планирования эксперимента. Математическая модель зависимости $\sigma_{02}=f(V, S, t)$ принята в виде степенной функции

$$\sigma_{02} = C_1 V^{z_1} S^{z_2} t^{z_3}. \quad (1)$$

Чтобы определить неизвестные, входящие в (1), необходимо применить метод планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^3 . При реализации такого ПФЭ требуется выполнить $N=8$ опытов [5]. Регрессионная модель имеет вид

$$y = \ln \sigma_{02} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (2)$$

где y – значение функции отклика; x_1, x_2, x_3 – варьируемые факторы; b_1, b_2, b_3 – коэффициент регрессии, отражающий степень влияния каждого фактора на функцию отклика; $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты парного и тройного взаимодействия, определяемые средним квадратичным методом и расширенной матрицей планирования ПФЭ; b_0 – свободный член. Согласно работе [6]: $x_1 \equiv x_2 x_3$; $x_2 \equiv x_1 x_3$; $x_3 \equiv x_1 x_2$. Учитывая эти обозначения, получено выражение

$$y = \ln \sigma_{02} = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 + B_3 x_3 + E, \quad (3)$$

где $B_0 = b_0 + b_{123}$, $B_1 = b_1 + b_{23}$, $B_2 = b_2 + b_{13}$, $B_3 = b_3 + b_{12}$; E – размер ошибки. Коэффициенты регрессии определяются по формуле

$$B_{ij} = \sum_{i,j=1}^8 x_{ij} \cdot y_i / N. \quad (4)$$

Адекватность уравнения регрессии эксперименту проверялась по критерию Фишера. Дисперсия адекватности равна [7]

$$s_{ad}^2 = m \sum_{i=1}^N (\bar{y} - y_i)^2 / (N - l), \quad (5)$$

где l – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Обсуждение результатов. В табл. 1 приведены план опытов и матрица планирования, в табл. 2 – результаты экспериментов, а в табл. 3 – значения коэффициентов регрессии и факторов.

Таблица 1

План опытов и матрица планирования

№	План опытов			Матрица планирования			
	V, м/мин	S, мм/об	t, мм	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃
1	30	0,11	0,5	+	-	-	-
2	150	0,11	0,5	+	+	-	-
3	30	0,3	0,5	+	-	+	-
4	150	0,3	0,5	+	+	+	-
5	30	0,11	1,0	+	-	-	+
6	150	0,11	1,0	+	+	-	+
7	30	0,3	1,0	+	-	+	+
8	150	0,3	1,0	+	+	+	+

Таблица 2

Результаты экспериментов

Сталь 45		Сталь 40X		Сталь 35ХГСА		Латунь ЛС62	
σ_{02} , МПа	$y=\ln\sigma_{02}$	σ_{02} , МПа	$y=\ln\sigma_{02}$	σ_{02} , МПа	$y=\ln\sigma_{02}$	σ_{02} , МПа	$y=\ln\sigma_{02}$
500	6,2	560	6,32	840	6,73	680	6,52
630	6,44	760	6,63	1065	6,97	930	6,83
535	6,28	595	6,38	820	6,7	705	6,55
665	6,5	800	6,68	1100	7,0	940	6,84
820	6,7	825	6,71	1115	7,01	955	6,86
810	6,69	1100	6,7	1500	7,31	1260	7,13
700	6,55	865	6,76	1150	7,04	985	6,89
840	6,73	1150	7,04	1555	7,34	1315	7,18

Таблица 3

Значения коэффициентов регрессии и факторов

Обрабатываемый материал	Коэффициенты регрессии				Значение факторов
	b_0	b_1	b_2	b_3	
Сталь 45	6,51	0,078	0,003	0,15	$x_1=1,24\ln V-5,2$ $x_2=2\ln S+3,4$ $x_3=2,9\ln t+1$
Сталь 40X	6,65	0,12	0,062	0,15	
Сталь 35ХГСА	7,01	0,14	0,007	0,16	
Латунь ЛС 62	6,85	0,145	0,015	0,165	

Подставляя значения коэффициентов регрессии и факторов в (1), получим следующие математические модели:

- для стали 45 –

$$\sigma_{02}=525 V^{0,096} S^{0,006} t^{0,43}, \quad (6)$$

- для стали 40X –

$$\sigma_{02}=593 V^{0,15} S^{0,12} t^{0,43}, \quad (7)$$

- для стали 35ХГСА –

$$\sigma_{02}=642 V^{0,17} S^{0,014} t^{0,32}, \quad (8)$$

- для латуни ЛС62 –

$$\sigma_{02}=539 V^{0,18} S^{0,03} t^{0,47}. \quad (9)$$

Проверка адекватности полученных математических моделей проводилась по критерию Фишера (уровень значимости составляет $P=0,005$).

Таблица 4

Величины остаточных напряжений в зависимости от режимов резания

№	$\sigma=f(V), \text{Mpa}$				
	V, м/мин	Сталь 45	Сталь 40X	Сталь 35ХГСА	Латунь ЛС62
1	30	636,8(-)	719,5(+)	1020(+)	827,5(-)
2	60	680,6(-)	798(+)	1148(+)	937,5(-)
3	90	707(-)	848,4(-)	1230(+)	1008,5(-)
4	120	727,5(-)	885,8(-)	1292(+)	1062(-)
5	150	743,2(-)	916(-)	1342(-)	1105,5(-)
№	$\sigma=f(S), \text{Mpa}$				
	S, мм/об	Сталь 45	Сталь 40X	Сталь 35ХГСА	Латунь ЛС62
1	0,11	705(-)	789,5(+)	1220(+)	990,5(-)
2	0,15	706,5(-)	819,5(-)	1225(+)	999,8(-)
3	0,2	707,7(-)	848,3(-)	1230(+)	1008,4(-)
4	0,25	708,6(-)	871,4(-)	1234(+)	1015(-)
5	0,3	709,5(-)	890,6(-)	1237(+)	1020,8(-)
№	$\sigma=f(t), \text{Mpa}$				
	t, мм	Сталь 45	Сталь 40X	Сталь 35ХГСА	Латунь ЛС62
1	0,5	594,4(-)	712,6(+)	1080,5(+)	550,6(-)
2	0,6	643(-)	770,7(+)	1145,4(+)	600(-)
3	0,7	687(-)	823,5(-)	1203,3(+)	645(-)
4	0,8	727,6(-)	872(-)	1256(+)	686,8(-)
5	0,9	765,4(-)	917,5(-)	1283,7(+)	725,9(-)
6	1,0	800,8(-)	960(-)	1348,8(-)	762,7(-)

Имея математические модели зависимостей и расчеты, приведенные в табл. 4, для наглядности построены графики, иллюстрирующие эти зависимости (рис.1). При этом для определения знака остаточных напряжений использован метод, изложенный в [8], согласно которому, если $\sigma_b/\sigma_{02} < 1,25$, то в слое обработанной поверхности возникают сжимающие остаточные напряжения, а если $\sigma_b/\sigma_{02} > 1,25$, то – растягивающие.

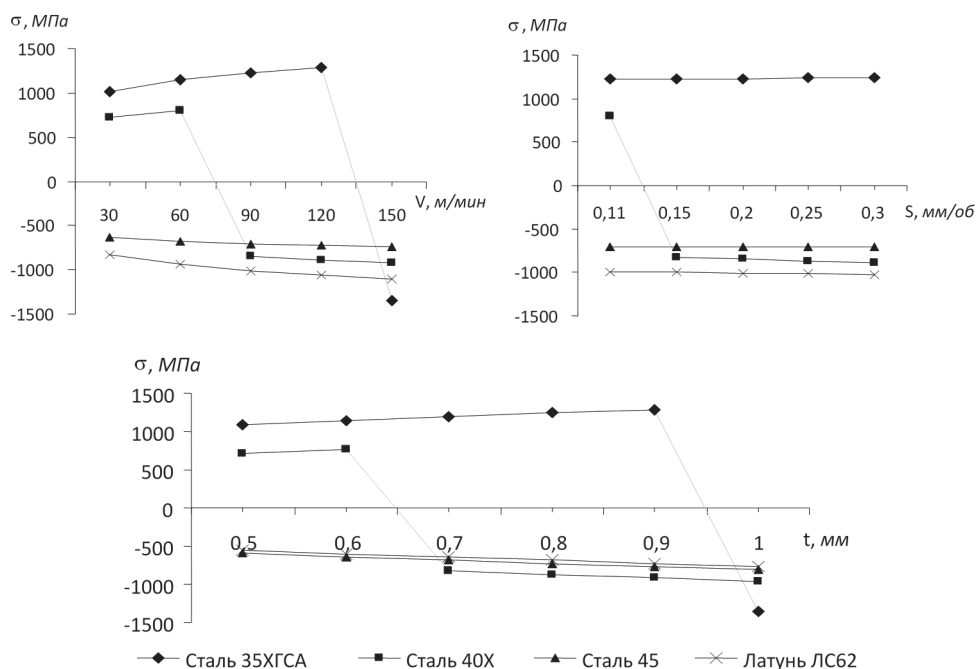


Рис. 1. Графики влияния режимов резания на остаточные напряжения

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение величины скорости резания при обработке стали 40Х и стали 35ХГСА, начиная соответственно с $V=75$ м/мин и $V=135$ м/мин, приводит к тому, что положительные – растягивающие остаточные напряжения постепенно преобразуются в отрицательные – сжимающие остаточные напряжения. При обработке стали 45 и латуни ЛС62 с увеличением величины скорости резания величина сжимающих остаточных напряжений увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением скорости резания уменьшаются составляющие силы резания, но вместе с тем увеличивается температура резания. Температурный фактор активнее влияет на возникновение сжимающих остаточных напряжений;

- при обработке стали 35ХГСА с увеличением величины подачи резания в поверхностном слое не возникают сжимающие остаточные напряжения. При обработке остальных исследуемых металлов, начиная с определенной величины, увеличение подачи резания приводит к возникновению сжимающих остаточных напряжений. Здесь также на первый план выходит температурный фактор, который активно влияет на возникновение сжимающих остаточных напряжений;

- увеличение величины глубины резания при обработке стали 35ХГСА в диапазоне $t=0,9...1,0$ мм приводит к тому, что в поверхностном слое возник-

кают сжимающие остаточные напряжения, при обработке стали 40X остаточные напряжения приобретают сжимающий характер при $t > 0,55$ мм; при обработке стали 45 с увеличением глубины резания увеличиваются сжимающие остаточные напряжения. Это также объясняется увеличением температуры резания. При обработке стали 40X глубиной резания $t = 0,5$ мм в поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения, что нежелательно. Это объясняется влиянием силового фактора.

Анализ проведенных исследований показал, что на окончательные параметры качества поверхностных слоев деталей машин из всех технологических факторов сравнительно активное воздействие оказывает температурный фактор. Так как значительная часть затраченной работы при резании переходит в тепло, при этом температура распределяется неравномерно – из зоны более высокой температуры тепло переходит в зону более низкой температуры, то возникают напряжения, которые впоследствии переходят к остаточным напряжениям. Т.е. температура резания влияет на пластичность обрабатываемого материала, отклонение физических свойств поверхностного слоя от физических свойств основной массы исходного металла характеризуется возникновением в этом слое остаточных напряжений. Далее проведены исследования с целью установления функциональной связи температуры в зоне резания в зависимости от режимов резания с последующим установлением функциональной связи температуры в зоне резания и остаточных напряжений.

Математическая модель связи температуры резания и режимов резания также принята в виде степенной функции

$$\theta = C_1 V^{z_1} S^{z_2} t^{z_3}. \quad (10)$$

Результаты экспериментов и значения коэффициентов регрессии и факторов приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

План и результаты экспериментов

№	План опытов			Сталь 45 $\theta, ^\circ\text{C}$	Сталь 40X $\theta, ^\circ\text{C}$	Сталь 35ХГСА $\theta, ^\circ\text{C}$	Латунь ЛС62 $\theta, ^\circ\text{C}$
	V, м/мин	S, мм/об	t, мм				
1	30	0,11	0,5	93	98	105	90
2	150	0,11	0,5	185	190	197	170
3	30	0,3	0,5	115	120	125	110
4	150	0,3	0,5	230	240	240	205
5	30	0,11	1,0	110	120	120	105
6	150	0,11	1,0	220	237	230	195
7	30	0,3	1,0	140	150	150	125
8	150	0,3	1,0	279	294	280	235

Таблица 6

Значения коэффициентов регрессии и факторов

Материал	Коэффициенты регрессии				Значение факторов
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	
Сталь 45	5,1	0,35	0,11	0,089	x ₁ =1,24lnV-5,2 x ₂ =2lnS+3,4 x ₃ =2,9ln t+1
Сталь 40X	5,12	0,34	0,106	0,06	
Сталь 35ХГСА	5,17	0,33	0,1	0,08	
Латунь ЛС 62	5,01	0,32	0,1	0,03	

Подставляя в (10) значения коэффициентов регрессии и факторов, получаем

для стали 45 –

$$\theta = 42V^{0,43}S^{0,22}t^{0,26}; \quad (11)$$

для стали 40X –

$$\theta = 46,5V^{0,42}S^{0,21}t^{0,32}; \quad (12)$$

для стали 35ХГСА –

$$\theta = 48,4V^{0,4}S^{0,2}t^{0,23}; \quad (13)$$

для латуни ЛС62 –

$$\theta = 42,5V^{0,39}S^{0,2}t^{0,2}. \quad (14)$$

Далее, проведя некоторые математические вычисления и преобразования, подставляя средние значения параметров режимов резания данного плана S=0,2 мм/об и t=0,75 мм, приравнявая скорости резания, получены математические модели связи температуры резания с остаточным напряжением:

для стали 45 –

$$\sigma_{02} = 0,89\theta^{1,16}; \quad (15)$$

для стали 40X –

$$\sigma_{02} = 0,98\theta^{1,14}; \quad (16)$$

для стали 35ХГСА –

$$\sigma_{02} = \theta^{1,15}; \quad (17)$$

для латуни ЛС62 –

$$\sigma_{02} = 0,87\theta^{1,18}. \quad (18)$$

Для наглядности влияния температуры резания на характер возникающих остаточных напряжений построены графики зависимостей (рис. 2).

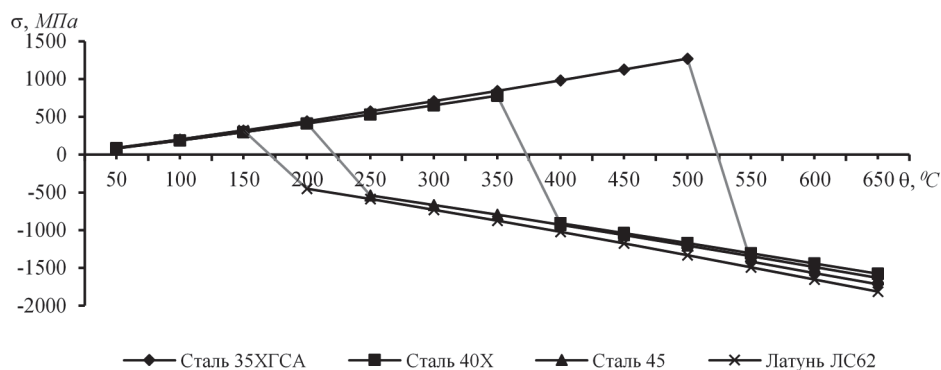


Рис. 2. График влияния температуры резания на технологические остаточные напряжения

Графики влияния температуры резания на остаточные напряжения наглядно показывают, что с увеличением температуры резания увеличиваются и растягивающие остаточные напряжения. Для каждого материала это явление имеет место до определенной температуры, а далее, с увеличением температуры, растягивающие остаточные напряжения переходят в сжимающие. Конкретно, для данных металлов эти переходные температуры следующие: сталь 45 – $\theta=245$ °С, сталь 40Х – $\theta=360$ °С, сталь 35ХГСА – $\theta=517$ °С, латунь ЛС62 – $\theta=180$ °С, т.е. это переходное явление для металлов, имеющих высокую удельную теплоемкость, наступает при высоких температурах резания. Следовательно, обработку резанием необходимо проводить при больших величинах параметров режима резания, чем при резании металлов, имеющих низкую величину удельной теплоемкости.

Заключение. В процессе исследований получены результаты, отличающиеся новизной.

1. На основе исследований дополнена информация и введены уточнения в имеющиеся математические модели зависимостей, получены математические модели зависимостей остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое, от режимов резания и температуры в зоне резания.

2. Анализ графических данных влияния режимов резания на характер остаточных напряжений показал, что с увеличением величин режимов резания увеличиваются абсолютные величины остаточных напряжений, при этом температурный фактор более активно влияет на возникновение сжимающих остаточных напряжений.

3. С целью получения сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое после лезвийной обработки для исследуемых металлов установлены рекомендательные назначения режимов резания, которые имеют следующие предельные значения:

- для стали 45 – $V=105...140$ м/мин, $S=0,11...0,18$ мм/об, $t=0,5...0,8$ мм;
- для стали 40Х – $V=95...145$ м/мин, $S=0,13...0,2$ мм/об, $t=0,5...0,9$ мм;
- для стали 35ХГСА – $V=110...150$ м/мин, $S=0,11...0,2$ мм/об, $t=0,75...1,0$ мм;
- для латуни ЛС62 – $V=125...150$ м/мин, $S=0,11...0,25$ мм/об, $t=0,5...1,0$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобров В.Ф.** Основы теории резания металлов. -М.: Машиностроение, 1975. –344 с.
2. **Исаев А.И.** Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием. – М.: Машгиз, 1984. –358 с.
3. А.с. РА №1640А2. Способ выбора материала режущего инструмента при резании металлов / **Г.Б. Багдасарян, В.Г. Багдасарян, Н.Г. Багдасарян, М.Е. Арутюнян.** -2006. - 7 с.
4. **Багдасарян Г.Б., Арутюнян Г.А., Багдасарян В.Г.** Определение основных углов резца по разрывному полю обрабатываемого материала // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1995. -Т.48, №1. –С. 3-7.
5. **Яковлев К.П.** Математическая обработка результатов эксперимента. –М., 1983. –360 с.
6. **Касьян М.В., Багдасарян Г.Б., Арутюнян Г.А.** Оптимизация технологических факторов при резании методом многофакторного планирования экспериментов. –Ереван: Айастан, 1990. –161 с.
7. **Кобзарь А.И.** Прикладная математическая статистика. –М.: Физматлит, 2006.–816 с.
8. **Подзей А.В., Сулима А.М., Евстигнеев М.И.** Технологические остаточные напряжения. - М.: Машиностроение, 1993. – 216 с.

Հ.Բ. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, Մ.Ե. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Վ.Հ. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ

ՍԱՅՐԱՅԻՆ ԿՏՐՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ ԿՏՐՄԱՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՄՆԱՑՈՐԴԱՅԻՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԶԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՎՐԱ

Դիտարկված են սայրային մշակումից հետո մերձմակերևութային շերտում տեխնոլոգիական մնացորդային լարումների ձևավորման վրա կտրման ռեժիմների ազդեցության հարցերը: Կատարված է հետազոտության արդյունքների համառոտ վերլուծություն, տրված են կտրման ռեժիմների հանձնարարական նշանակումներ, որոնց դեպքում մերձմակերևութային շերտում կուտակվում են սեղմող բնույթի մնացորդային լարումներ:

Առանցքային բաներ. սայրային կտրում, կտրման ռեժիմներ, մնացորդային լարումներ, կտրման ջերմաստիճան:

**H.B. BAGHDASARYAN, M.Ye. HARUTYUNYAN,
V.H. BAGHDASARYAN**

**IMPACT OF CUTTING MODES ON THE FORMATION OF
TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESSES AT BLADE CUTTING**

Issues on the impact of cutting modes on the formation of technological residual stresses in the subsurface layer at blade processing are considered. A brief analysis of the research results is carried out, appointment recommendations on the cutting modes are given at which in the subsurface layer, compressing residual stresses are accumulated.

Keywords: blade cutting, cutting parameters, residual stresses, cutting temperature.

ՀՏԴ 621.01

Ֆ.Հ. ՓԱՐԻԿՅԱՆ, Ա.Ս. ԲԱԲԱՅԱՆ, Վ.Գ. ԱՍԱՏՐՅԱՆ

**ԱՐԴՅՈՒՆԱԲԵՐԱԿԱՆ ՌՈՐՈՏԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՌԻՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ
ԵՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Արդիականացվել է արդյունաբերական ПМР0.5-МФ1 ոռքոտը՝ ժամանակակից մեքենաշինության պահանջներին համապատասխան: Արդիականացման արդյունքում ստեղծվել է նոր՝ բարձր ճշտությամբ, արագագործ, ծրագրային կառավարումով արդյունաբերական ոռքոտ: Շնորհիվ կոնստրուկցիոն փոփոխությունների՝ մանիպուլյատորը հնարավորություն է ընձեռում՝ ավելի մեծ տրամագծով և մեծ զանգվածով մեքենամասեր տեղափոխելու, բեռնելու և բեռնաթափելու համար:

Առանցքային բառեր. արդյունաբերական ոռքոտ, ծրագրային կառավարում, բարձր ճշտություն:

Ժամանակակից գիտատեխնիկական զարգացման հիմնական օրինաչափությունն է ավտոմատացման լայն կիրառումը տեխնիկայի գրեթե բոլոր ճյուղերում, արտադրական գործընթացների բոլոր օղակներում, առաջացնելով որակական զգալի փոփոխություններ, բացահայտելով այդ գործընթացների արտադրողականության բարձրացման հնարավորությունները՝ միաժամանակ թեթևացնելով աշխատանքային պայմանները:

Արդյունաբերական ոռքոտները (ԱՌ) լայնորեն կիրառվում են մեքենաշինությունում, հատկապես մետաղամշակման՝ ֆրեզման, գայլիկոնման, դրոշմման, ատամնաթործման և այլ գործընթացներում, սարքաշինությունում, ավտոմոբիլային արտադրությունում և այլուր՝ հիմնականում կատարելով մեքենամասերի տեղափոխում, թվային ծրագրային հաստոցների բեռնում և բեռնաթափում: Հետևաբար՝ արդյունաբերական ոռքոտը պետք է կարողանա տեղափոխել մանիպուլ-