

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАК ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

В.Н. Ковальногов, А.Н. Никифоров

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Известно, что температурный режим сверления является одним из главных факторов, лимитирующих производительность обработки, макрогеометрическую точность получаемых отверстий [1]. В силу затрудненного отвода выделяемой в зоне резания теплоты, процесс сверления отверстий, особенно глубоких и маломерных, отличается интенсивным затуплением и малым периодом стойкости инструмента [2]. При сверлении групп отверстий, особенно близкорасположенных, в связи с аккумуляцией выделяемой теплоты в сверле и заготовке, вопросы обеспечения точности обработки и стойкости сверл особенно актуальны. При этом в одних случаях для их решения достаточно рационализировать последовательность сверления отверстий в группе [3], а в других – предпринять специальные технические и технологические приемы для снижения теплосилового напряжения обработки. Так, заметно повысить эффективность сверления позволяет ультразвуковая (УЗ) техника активации элементов технологической системы (заготовки и сверла) и смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [1, 4].

Сотрудниками Ульяновского государственного технического университета выполнен ряд НИР и ОКР по совершенствованию технологии сверления отверстий на промышленных предприятиях, некоторые результаты которых представлены в статье.

С целью выбора рациональной техники охлаждения инструмента при сверлении отверстий, которая бы наиболее производительно обеспечивала заданную точность обработки, было предпринято специальное исследование. Поскольку сверло в процессе сверления нагревается неравномерно по длине, линейное тепловое расширение $\Delta D(x)$ в каждом диаметральном его сечении различно (рис. 1) и определяется зависимостью:

$$\Delta D(x) = 2\beta_c \int_0^{D/2} [T(r, x) - T_0] dr . \quad (1)$$

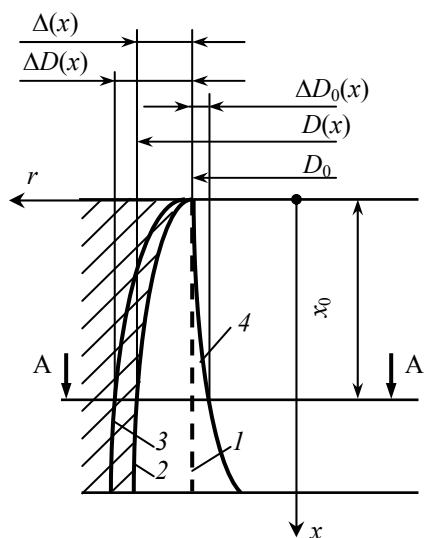


Рис. 1. Схема к определению погрешности формы отверстия, обусловленной термическими деформациями сверла и заготовки

Также различно и линейное тепловое расширение $\Delta D_0(x)$, которое можно оценить следующей зависимостью:

$$\Delta D_0(x) = 2\beta_3 \int_{D/2}^{H-D/2} [T(r, x) - T_0] dr. \quad (2)$$

Результирующая погрешность диаметра отверстия в зависимости от соотношения между величинами $\Delta D(x)$ и $\Delta D_0(x)$ может быть как положительной, так и отрицательной:

$$\Delta(x) = \Delta D(x) - \Delta D_0(x). \quad (3)$$

Зависимость (3) позволяет рассчитать изменение диаметра отверстия в направлении движения подачи сверла вдоль оси x в каждом диаметральном сечении. Значение погрешности $\Delta(x)$ иллюстрирует схема на рис. 1. В результате теплового расширения сверла профиль формируемого отверстия (кривая 3) отличается от номинального (линия 1). Термические деформации заготовки обуславливают искажение формы отверстия (кривая 4), которую оно приняло бы после остывания, если бы на него не влияла форма сверла. Результирующая форма образующей отверстия (кривая 2) получается как суперпозиция кривых 3 и 4.

При обработке отверстий в заготовках из материалов, отличающихся низкой теплопроводностью, значительная доля генерируемой теплоты поступает в сверло, вызывая доминирующее его расширение и рост погрешности $\Delta D(x)$. Результирующая погрешность $\Delta(x)$ становится больше нуля и происходит «тепловая» разбивка отверстия. При изготовлении деталей из материалов с повышенной теплопроводностью, существенная часть генерируемой теплоты поглощается заготовкой, что приводит к доминированию погрешности $\Delta D_0(x)$ и «тепловой» усадке отверстия.

Как следует из анализа зависимостей (1) – (3), величина результирующей погрешности диаметра отверстия определяется тепловым состоянием инструмента и заготовки в процессе обработки. Это состояние моделировали численно с использованием математической модели и методики [1]. Некоторые результаты моделирования показаны на рис. 2 и 3.

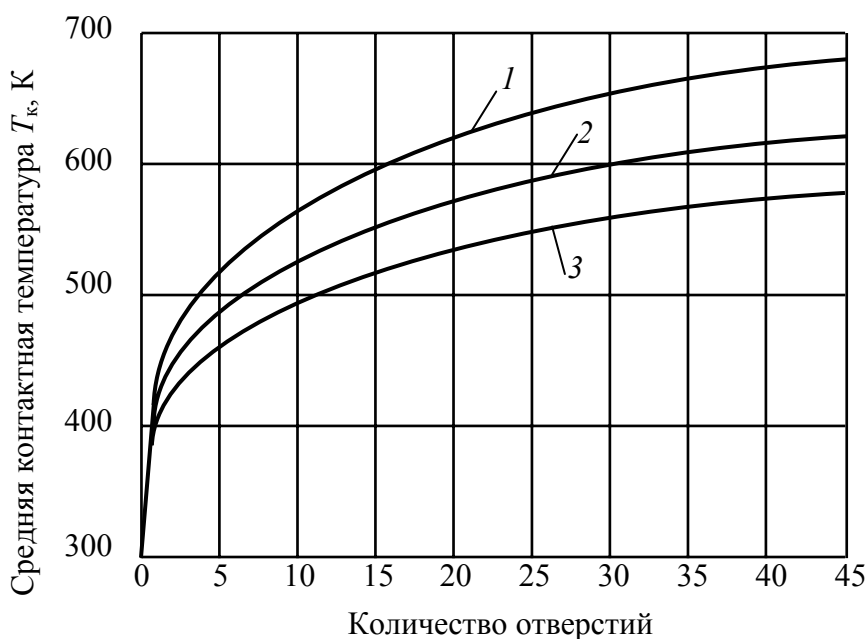


Рис. 2. Влияние количества отверстий, обработанных одним сверлом диаметром 1,5 мм подряд без избыточных холостых перемещений на температурный режим сверла: 1 – без ультразвука; 2, 3 – с наложением УЗ колебаний на СОЖ и заготовку соответственно. Режим обработки: $V = 7,6$ м/мин; подача 0,02 мм/об. Материал заготовки – сталь 12X18H10T, сверла – P18

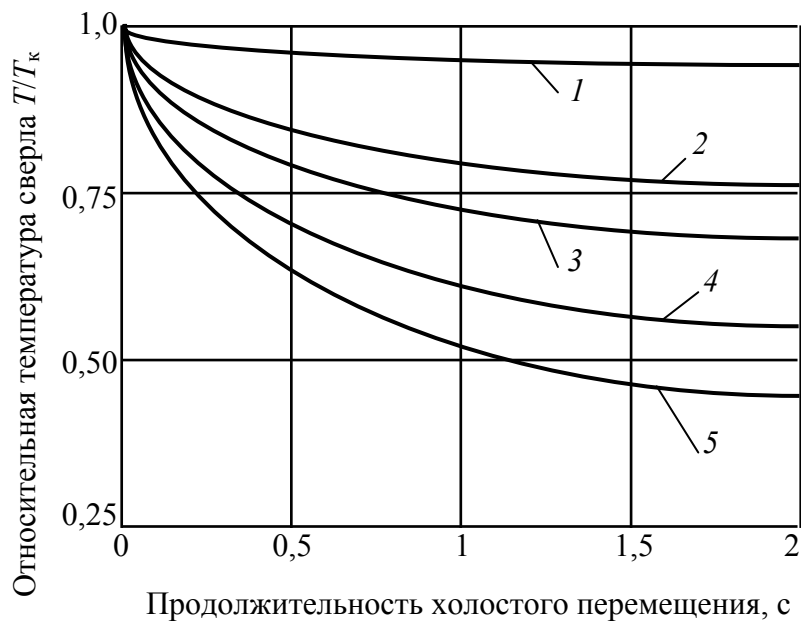


Рис. 3. Влияние продолжительности холостого перемещения на температурный режим сверла диаметром 1,5 мм: 1, 2, 3, 4, 5 – $T_k = 300, 400, 500, 600, 700$ К соответственно. Режим обработки: $V = 7,6$ м/мин; подача 0,02 мм/об. Материал заготовки – сталь 12X18H10T, сверла – P18; T – температура на режущей кромке сверла; T_k – температура в зоне контакта сверла с заготовкой

При этом в начальном условии, задающем исходное распределение температуры в сверле, учитывали, что предшествовало анализируемому процессу – сверление другого отверстия или охлаждение в результате холостого перемещения к последующему отверстию. Для уменьшения погрешностей диаметра отверстия необходимо уменьшать тепловую напряженность сверления, например, охлаждая сверла путем выбора рациональной траектории периодического холостого перемещения сверлильной наладки, или за счет ультразвуковой (УЗ) активации элементов технологической системы или СОЖ с помощью разработанной в Ульяновском государственном техническом университете техники.

Как следует из графика на рис. 2, температура сверла в связи с аккумуляцией в нем теплоты увеличивается по мере сверления новых отверстий. Периодическое охлаждение сверла за счет холостого перемещения между отверстиями позволяет до 2 раз и более уменьшить его температуру (рис. 3), при этом эффективность охлаждения возрастает с увеличением продолжительности перемещения, а также с увеличением исходной температуры сверла. Вместе с тем, избыточное холостое перемещение уменьшает производительность обработки, поэтому более привлекательным средством воздействия на тепловое состояние взаимодействующих при обработке объектов представляется УЗ активация элементов технологической системы и СОЖ.

По результатам анализа и численного моделирования (некоторые результаты которого показаны на рис. 2) теплового состояния сверла к реализации предложена технология сверления с дополнительным наложением на заготовку в процессе сверления УЗ колебаний частотой 18,6 кГц. В результате удалось заметно (в 1,2 раза) уменьшить тепловую напряженность в зоне обработки (кривая 3 по сравнению с кривой 1 на рис. 2) и темп ее роста по мере сверления новых отверстий. Это особенно важно в условиях одновременной обработки группы близкорасположенных отверстий, когда взаимное влияние тепловых источников в зонах сверления каждого отверстия приводит к разогреву большого объема заготовки, увеличению ее термических деформаций и, как следствие, отжатию и уходу сверл в наладке.

Далее в программно-вычислительном комплексе ANSYS, с использованием полученных результатов расчета теплового состояния, моделировали термические

деформации сверла и заготовки и по зависимости (3) оценивали максимальную результирующую погрешность диаметра отверстий при различных вариантах УЗ активации (табл. 1). Результаты этой части исследований свидетельствуют о возможности значительного уменьшения термических деформаций, а значит и отжатий и увода сверл, за счет рационального применения ультразвука.

Таблица 1

Сравнительная эффективность различных способов УЗ активации при сверлении отверстий

Способ УЗ активации	T_k, K	$\Delta(x), \text{мкм}$
Без активации	675	5,1
Активация СОЖ	630	2,3
Активация заготовки	580	0,09

Улучшение теплосиловой напряженности зоны сверления за счет УЗ активации СОЖ и элементов технологической системы открывает возможность форсирования производительности обработки при сохранении заданной точности и периода стойкости инструмента.

Количественную оценку возможности увеличения производительности глубокого сверления по машинному времени $\Delta\Pi$ при сохранении заданного периода стойкости сверла за счет использования УЗ техники проводили аналитически по следующей схеме (рис. 4). По заданному значению τ_{c0} периода стойкости сверла (например, равному периоду стойкости при сверлении по базовой технологии), которое требуется обеспечить, отыскивали с использованием графика зависимости «период стойкости – температурный режим обработки» критическое (с позиции стойкости) значение температуры $T_{кр}$.

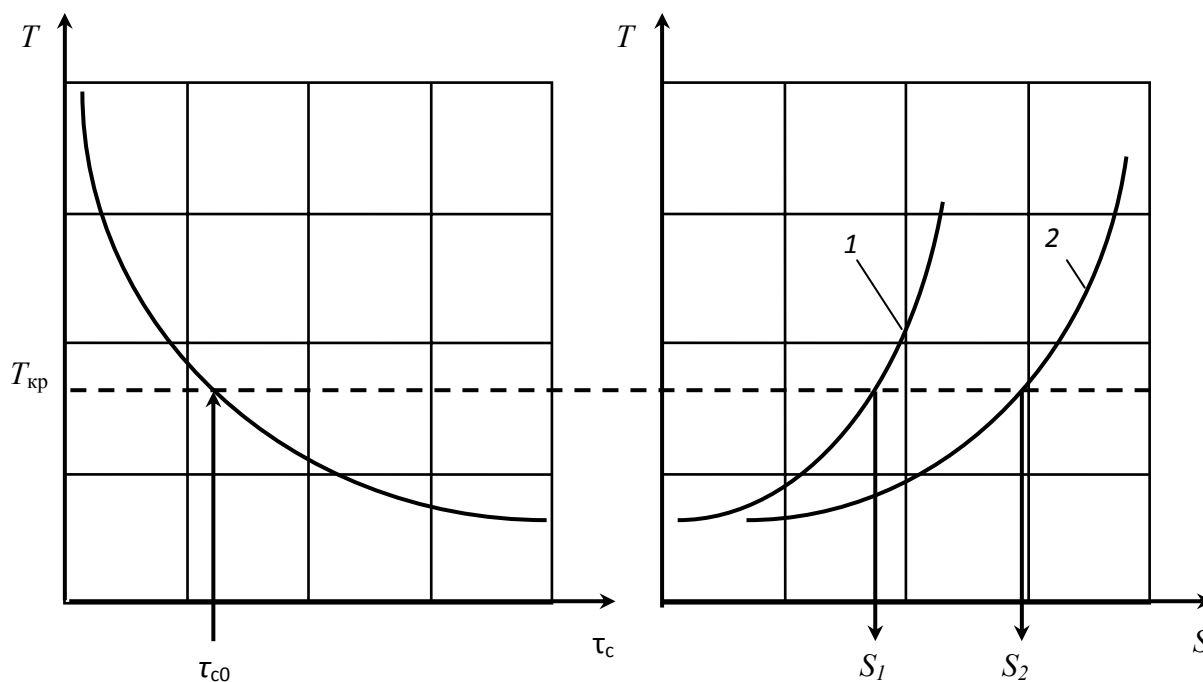


Рис. 4. Схема для расчета возможности повышения производительности глубокого сверления путем использования УЗ активации технологической системы: 1, 2 – соответственно базовая и новая технология; τ_{c0} – требуемый период стойкости сверла

Далее по значению $T_{кр}$ и кривым (1 и 2 на рис. 4) зависимости температуры от режима сверления отыскивали значения максимальной допустимой скорости подачи сверла по новой S_2 и базовой S_1 технологии. По найденным значениям S_1 и S_2 возможное увеличение производительности рассчитывали по зависимости:

$$\Delta\Pi = \frac{S_2}{S_1} \cdot 100\% . \quad (4)$$

Необходимые для расчета $\Delta\Pi$ зависимости, связывающие температурный режим обработки с периодом стойкости сверла, с одной стороны, и с производительностью сверления (подачей сверла) с другой стороны, получали в два этапа.

Зависимость периода стойкости τ_c сверла от температурного режима глубокого сверления получали экспериментально. Эксперименты выполнили на образцах из стали 40Х, в которых до потери стойкости сверла из стали Р18 сверлили отверстия диаметром 4 и глубиной 50 мм. Период стойкости сверла τ_c определяли по предельному износу, который фиксировали путем прямых измерений на передней и задней поверхностях и поверхности ленточки (максимально допустимый износ по задней поверхности для спирального сверла \varnothing 4 мм составлял 0,35 мм). Размер фасок износа измеряли после обработки каждого отверстия на микроскопе отсчетного типа МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм и погрешностью показаний 0,02 мм с использованием специального приспособления.

Варьирование температурным режимом обработки обеспечивали в экспериментах за счет изменения скорости резания в диапазоне от 17,5 до 28,0 м/мин, подачи сверла – от 0,01 до 0,05 мм/об., а также параметров УЗ поля. Результаты первого этапа исследований в виде графика зависимости «период стойкости – температурный режим» приведены на рис. 5.



Рис. 5. Взаимозависимость температурного режима глубокого сверления с периодом стойкости сверла. Материал заготовки – сталь 40Х, инструмента – Р18

На втором этапе проводили численное моделирование (рис. 6) теплового состояния инструмента и заготовки при глубоком сверлении с использованием математической модели и методики [2].

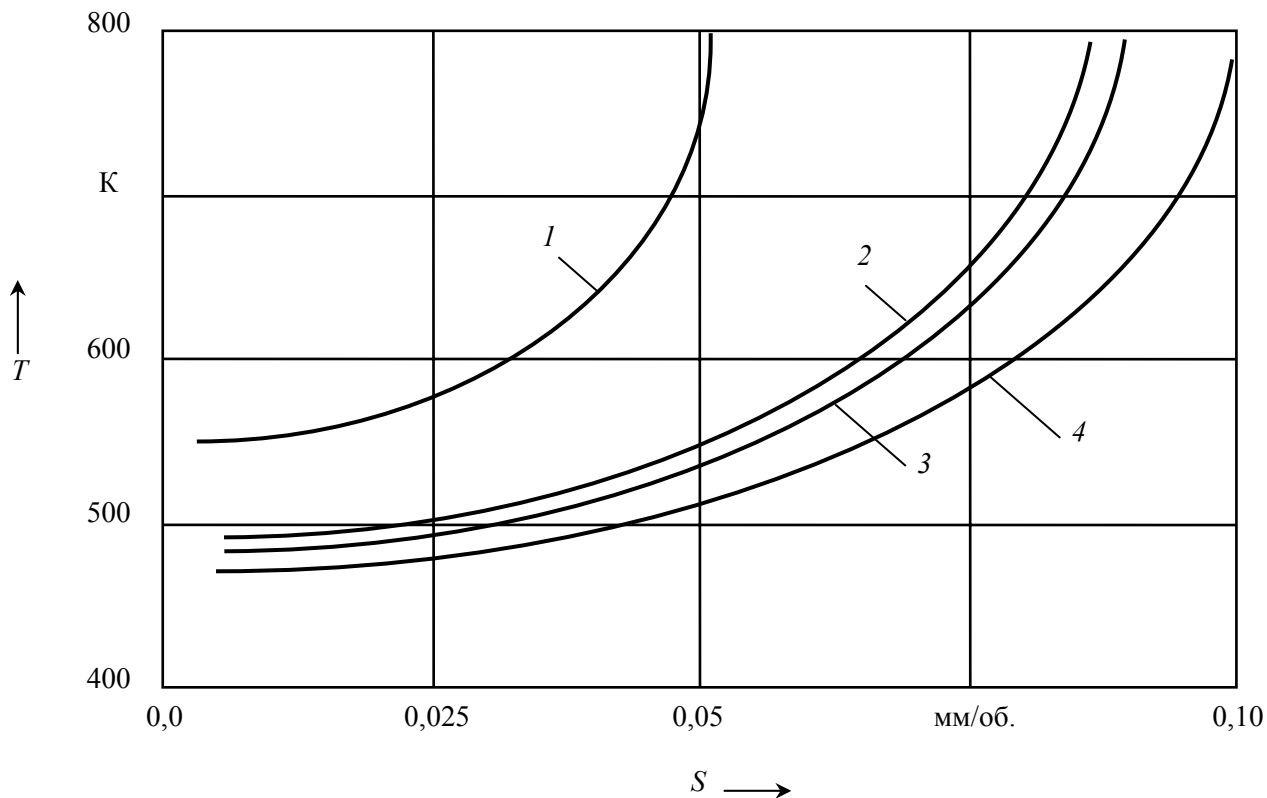


Рис. 3. Влияние интенсивности глубокого сверления отверстий в заготовках их стали 40X на температурный режим обработки при разных способах УЗ активации технологической системы и СОЖ: 1 – без активации; 2 – активация СОЖ; 3 – активация сверла; 2 – активация СОЖ и сверла

По результатам этих двухэтапных исследований по зависимости (4) провели расчет возможного увеличения производительности обработки при различных значениях требуемой стойкости сверла (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительная эффективность различных способов УЗ активации технологической системы при глубоком сверлении маломерных отверстий

Способ УЗ активации	$\tau_{с0}$, мин	S , мм/об.	$\Delta\Pi$, %
1	2	3	4
Без активации (базовая технология)	10	0,035	–
	15	0,015	–
	20	не обеспечивает	–
Активация СОЖ	10	0,060	171

	15	0,047	313
	20	0,040	–

Окончание табл. 2

1	2	3	4
Активация сверла	10	0,065	186
	15	0,059	393
	20	0,047	–
Активация сверла и СОЖ одновременно	10	0,075	214
	15	0,067	447
	20	0,055	–

Сопоставление эффективности различных способов УЗ активации технологической системы проводили по сравнению с базовой технологией сверления (без активации). Как следует из анализа данных рис. 6 и табл. 2, период стойкости в 20 минут базовая технология не обеспечивает. При сравнительно небольшом заданном периоде стойкости (10 минут), УЗ активация обеспечивает возможность форсирования производительности сверления от 1,7 до 2,1 раза в зависимости от ее способа. При более высоком заданном периоде стойкости (15 минут), когда базовая технология становится критически неэффективной, УЗ активация обеспечивает возможность более существенного форсирования производительности сверления – уже от 3,1 до 4,5 раза в зависимости от ее способа. При этом наиболее эффективен способ одновременной активации СОЖ и сверла.

Опытно-промышленные испытания предложенной технологии сверления отверстий с наложением УЗ на заготовку подтвердили ее высокую эффективность. Установлено, что период стойкости сверл при этом увеличился в 5,5 раза и до 2 раз повышена производительность обработки за счет сокращения вспомогательного времени.

Таким образом, результаты выполненных исследований показали наличие значимых резервов для совершенствования технологии сверления отверстий, вскрываемых в каждом конкретном случае на основе теплофизического анализа технологических условий.

Обозначения

β_c – температурный коэффициент материала сверла, K^{-1} ; где β_z – температурный коэффициент материала заготовки, K^{-1} ; H – длина шага между осями соседних отверстий, м; D – диаметр сверла, м; T, T_0 – соответственно текущая и начальная температура, К; x, r – соответственно осевая и радиальная координата, м; $\Delta\Pi$ – относительное увеличение производительности обработки, %; S – подача сверла, мм/об.; τ_c – период стойкости сверла, мин; индексы 1 и 2 относятся к параметрам базовой и новой технологии обработки соответственно.

Литература

1. Киселев, Е.С. Эффективность использования энергии ультразвукового поля при глубоком сверлении отверстий малых размеров / Е.С. Киселев, М.В. Табеев // Справочник. Инженерный журнал, 2007. – № 9. – С. 24 – 33.

2. Киселев Е.С. Моделирование и численное исследование теплосилового взаимодействия заготовки и инструмента при глубоком сверлении с применением смазочно-охлаждающей жидкости и наложением ультразвука / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, М.В. Табеев // Труды V Минского международного форума по теплообмену. – Минск: Изд-во АНК «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2004. – Т. 2. – С. 376 – 378.

3. Ковальногов, В.Н. Исследование термических деформаций при сверлении группы высокоточных отверстий / В.Н. Ковальногов, Ю.А. Полуэктов // Вестник УлГТУ, 2007. – № 4. – С. 45 – 48.

4. Киселев, Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.