

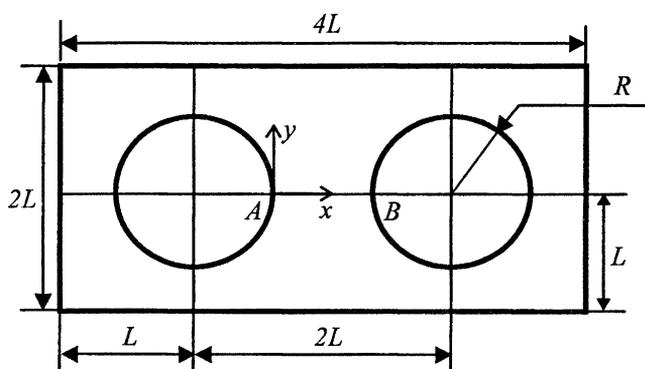
Л.В. Лиманова

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ ПЛАСТИНЫ С ДВУМЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ОТВЕРСТИЯМИ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Проведены расчеты изменения температуры, остаточных напряжений и пластических деформаций при термопластическом упрочнении пластины с двумя цилиндрическими отверстиями одинакового радиуса. При решении задачи учитывалась зависимость от температуры коэффициента теплоотдачи, предела текучести, модуля упругости и коэффициента линейного расширения. Исследовалось влияние упрочнения на напряженное состояние двух близко расположенных отверстий в пластине.

Как известно, остаточные напряжения оказывают большое влияние на циклическую и длительную прочность деталей машин. С целью наведения благоприятного напряженного состояния применяют методы упрочняющей технологии (виброгалтовка, гидродробеструйная и пневмодробеструйная обработки и др.). Основой этих методов является создание поверхностной, определенно ориентированной пластической деформации, вызывающей упрочнение с наложением напряженного поля сжатия. В поверхностном слое возникает наклеп, иногда проникающий на значительную глубину. В настоящее время имеется целый ряд работ, в которых говорится о вредном влиянии наклепа на предел выносливости при работе детали в условиях высоких температур, а иногда и при нормальных температурах. Метод термопластического упрочнения (ТПУ) дает возможность избежать наклепа и создать, в то же время, достаточный по глубине слой с остаточными напряжениями сжатия. Толщина этого слоя может изменяться в зависимости от режима тепловой обработки, а также от размеров и формы детали.

Термопластическому упрочнению могут подвергаться изделия различной формы. В данной работе рассматривается влияние ТПУ на пластину с двумя цилиндрическими отверстиями одинакового радиуса (рис. 1). Технология ТПУ состоит в следующем: сначала изделие равномерно нагревается и в начальный момент времени имеет температуру $T_0 = 800$ °С. Затем включается устройство, которое подает под давлением жидкость, охлаждающую изделие с граничных поверхностей, согласно закону Ньютона (температура охлаждающей жидкости составляет 20 °С).



Р и с. 1. Пластина с двумя цилиндрическими отверстиями

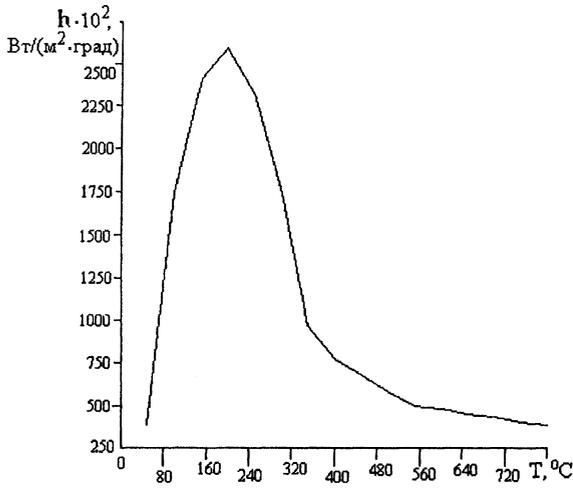
Для анализа процесса ТПУ с точки зрения формирования температурных и механических полей в пластине с двумя отверстиями были получены решения для задач двух различных типов:

- 1) определение температурного и механических полей для пластины с фиксированными размерами и с отверстиями различных радиусов;
- 2) определение температурного и механических полей для пластины с различными размерами и с отверстиями одного и того же радиуса.

Материал изделия - жаропрочный сплав ЭИ698 (выбор значения начальной температуры связан со свойствами этого материала). Теплофизические характеристики приведены в табл. 1 [1]. Здесь λ - коэффициент теплопроводности; c - удельная теплоемкость; ρ - плотность. Коэффициент теплоотдачи h

Таблица 1
Теплофизические характеристики сплава ЭИ698

λ , Вт/(м·град)	9.63
c , Дж/(кг·град)	502.8
ρ , кг/м ³	8320



Р и с. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры

ными ввиду быстрого падения температуры во времени и образования неупругих деформаций на самой ранней стадии охлаждения в поверхностном слое. Поэтому шаги по времени брались гораздо меньше в начале процесса охлаждения, а впоследствии возрастали. Шаги по пространственной координате были значительно мельче в поверхностных слоях, а ближе к середине изделия - крупнее.

зависит от температуры. Эта зависимость представлена на рис. 2.

Значения механических характеристик сплава ЭИ698 при различных температурах приведены в табл. 2. Здесь $\sigma_m(T)$ соответствует пределу текучести; E - модуль упругости; α - коэффициент линейного расширения. Предполагается, что коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$ и от температуры не зависит.

Расчеты были получены с помощью программы версии 5.0. Эта программа производит вычисления с помощью метода конечных элементов. Сначала решалась задача нахождения температурного поля по сечению изделия. Для нахождения корректного решения весь интервал по времени и координате разбивался на неравные шаги. Шаги брались неравными

Т а б л и ц а 2

Механические характеристики сплава ИЭ698

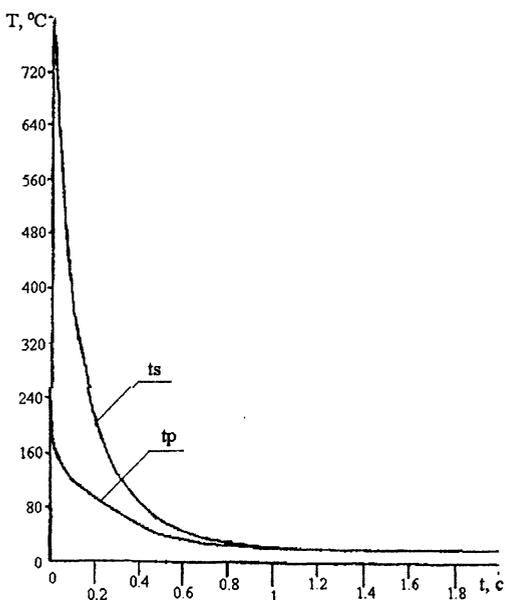
$T, ^\circ C$	20	400	550	650	700	800
$\sigma_m, МПа$	750	710	680	630	630	600
$E \cdot 10^{-5}, МПа$	2.0	1.84	1.8	1.6	1.55	1.45
$\alpha \cdot 10^6, 1/град$	12.0	15.7	17.3	18.8	20.1	23

Рассмотрим пластину, изображенную на рис. 1. Принимаем $L = 1$ мм, а R будем считать параметром со значениями: $R = 0.5, 0.6, 0.7$ мм (задача первого типа). Охлаждение пластины производится на цилиндрических поверхностях отверстий.

Наиболее интересным с точки зрения влияния ТПУ на остаточные напряжения является отрезок AB между отверстиями. Поэтому в работе рассматривалось распределение температурных и механических полей в точках данного отрезка.

Результаты решения температурных задач для пластины с радиусом отверстий, равным

0.5 мм, представлены на рис. 3 и 4. Рис. 3 иллюстрирует распространение температурного поля во времени. Кривая tp соответствует изменению температуры в точках на концах рассматриваемого отрезка, которые находятся на поверхности отверстия, а кривая ts дает представление об изменении температуры в середине отрезка AB . Из графика видно, что наибольшая разность температур между охлаждаемыми поверхностями и серединой отрезка AB наблюдается в первые моменты времени. В конце процесса охлаждения температура выравнивается и становится равной температуре среды. Характер графиков изменения температуры для пластин с отверстиями других радиусов аналогичен представленному, различие заключается лишь в длительности процесса.

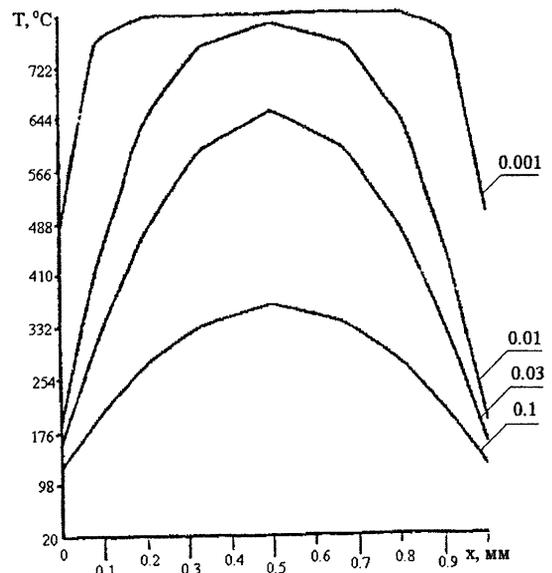


Р и с. 3. Изменение температуры в зависимости от времени для пластины с отверстиями радиуса 0.5 мм

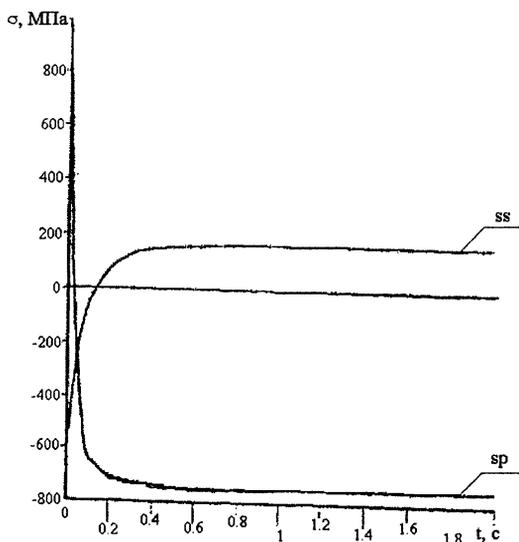
Рис. 4 показывает распределение температуры для разных моментов времени. Цифрами на графике указаны рассматриваемые моменты времени в секундах. При сравнении поведения температуры на

поверхности изделия для пластин с радиусом отверстий $0.6 - 0.7$ мм, было замечено, что изменение температуры на поверхности в первые моменты времени практически не зависит от величины радиуса (на графиках - кривые, соответствующие времени 0.001 и 0.01 с). А в середине изделия картина качественно меняется: с увеличением радиуса изделия охлаждение в середине между отверстиями происходит более быстро. Поэтому зависимость разности температур от радиуса отверстий изделия обратная: чем больше радиус, тем меньше разность температур, возникающая между охлаждаемыми поверхностями и серединой отрезка AB . Она будет наибольшей при $R = 0.5$ мм и уменьшается с увеличением радиуса отверстий.

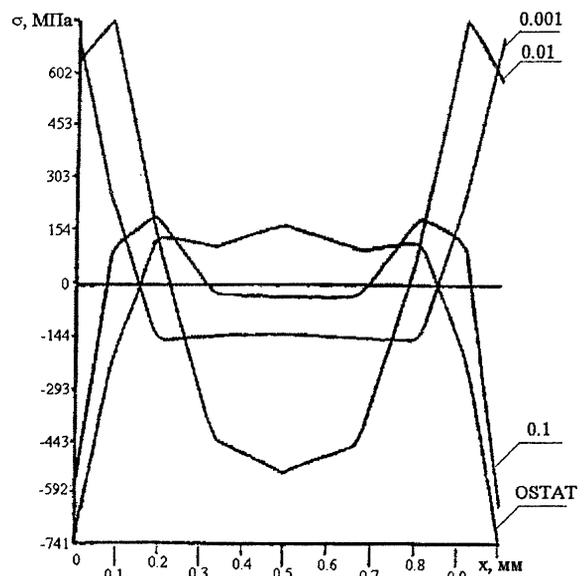
Результаты решения задачи определения поля остаточных напряжений для пластины с отверстиями радиуса 0.5 мм показаны на рис. 5 и 6. Рис. 5 дает представление об изменении напряжения $\sigma = \sigma_y$ во времени. Кривая sp соответствует точке на поверхности отверстия, а кривая ss - точке, расположенной по середине отрезка AB . Из графика видно, что на ранних стадиях охлаждения на охлаждаемой поверхности возникают растягивающие напряжения. С течением времени напряжения начинают уменьшаться за счет появления пластических деформаций и на завершающей стадии охлаждения знак напряжений противоположен тому, который был на начальной стадии ТПУ. Данный процесс формирования остаточных напряжений характерен и для пластин с отверстиями других радиусов. Разница заключается в величине напряжений и длительности процесса.



Р и с. 4. Распределение температурных полей в пластине с двумя цилиндрическими отверстиями радиуса 0.5 мм



Р и с. 5. Распределение напряжений во времени для пластины с отверстиями радиуса 0.5 мм



Р и с. 6. Распределение напряжений в пластине с отверстиями радиуса 0.5 мм

На рис. 6 представлено распределение напряжения $\sigma = \sigma_y$ в точках отрезка AB для разных моментов времени (время указано в секундах). Остаточным напряжениям соответствует кривая с названием $OSTAT$. Из сравнения графиков для пластин с радиусом отверстий $0.6 - 0.7$ мм видно, что максимальной величины остаточные напряжения достигают при радиусе отверстий 0.5 мм и равны 718.1 МПа, а с увеличением радиуса их величина уменьшается. Также можно заметить, что увеличение радиуса отверстий в пластине вызывает и изменение вида

эпюры остаточных напряжений: величина растягивающих напряжений в середине отрезка AB увеличивается при изменении радиусов отверстий.

Влияние радиуса отверстий на величину проникновения (H) остаточных напряжений в глубь изделия представлено в табл. 3. Как следует из данных табл. 3, изменение радиуса отверстий в пластине оказывает влияние на глубину проникновения остаточных напряжений: с увеличением R в пластине происходит уменьшение глубины проникновения. Также можно сделать вывод о том, что с увеличением радиуса отверстий происходит уменьшение величины H/R и упрочнение изделия перестает играть существенную роль при $R > 0.6$ мм.

Таблица 3
Влияние радиуса отверстий на величину проникновения остаточных напряжений

$R, \text{мм}$	$H, \text{мм}$	H/R
0.5	0.155	0.31
0.6	0.125	0.208
0.7	0.056	0.08

На рис. 7 и 8 представлены

распределения пластических деформаций $e^p = e_y^p$ для пластины с отверстиями радиусов 0.5 мм. Рис. 7 иллюстрирует формирование пластических деформаций во времени. Кривые соответствуют точкам на охлаждаемой поверхности (pp) и в середине между отверстиями (ps). Из рисунка видно, что в некоторый момент времени на поверхности отверстий возникают вторичные пластические деформации из-за того, что напряжения превысили предел текучести для соответствующей температуры. Также можно заметить, что наибольшие пластические деформации появляются уже в первые моменты времени, а их формирование с учетом вторичных пластических деформаций заканчивается к моменту окончания процесса охлаждения. Подобным образом протекает процесс формирования пластических деформаций и в пластинах с отверстиями других радиусов.

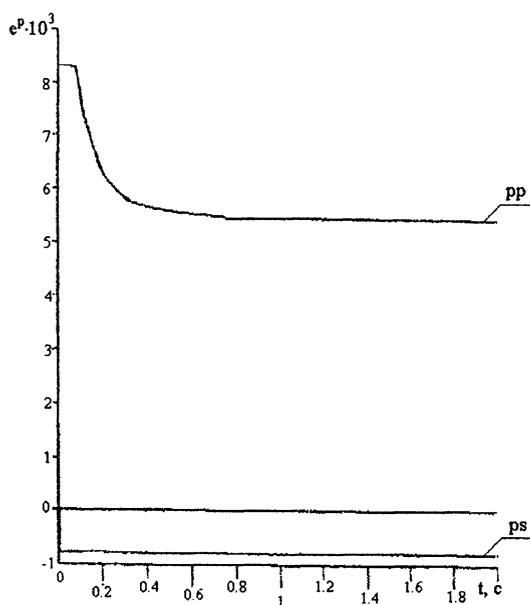


Рис. 7. Распределение пластических деформаций во времени для пластины с отверстиями радиуса 0.5 мм

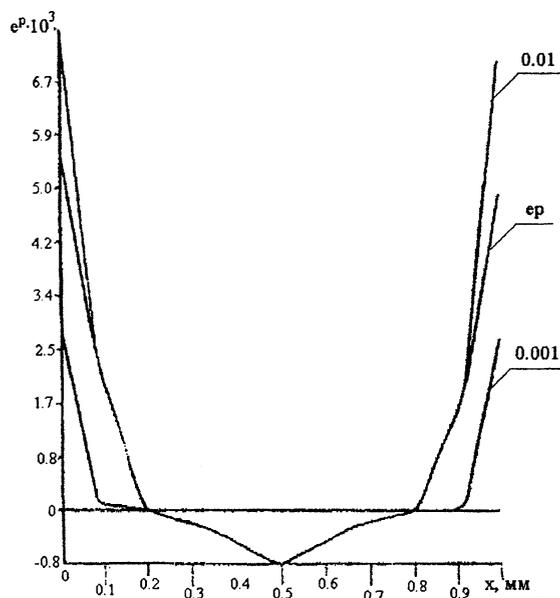


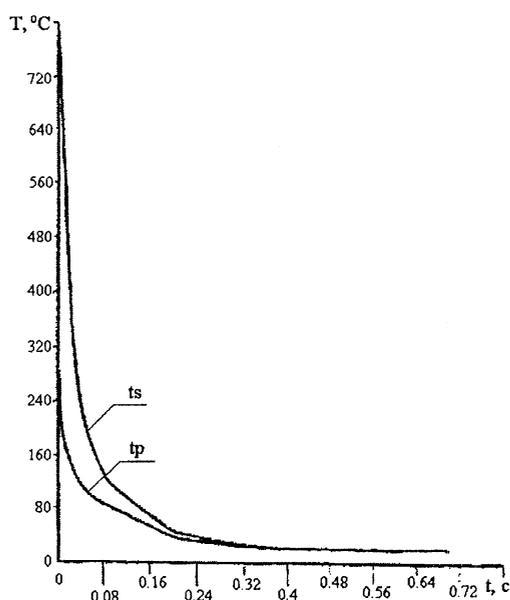
Рис. 8. Распределение пластических деформаций в пластине с отверстиями радиуса 0.5 мм

На рис. 8 показано распределение пластических деформаций $e^p = e_y^p$ для различных моментов времени. Из графика видно, что наличие пластических деформаций наблюдается не только вблизи охлаждаемых поверхностей, но и в середине отрезка AB . Это было отмечено и в случае пластины с одним отверстием [2]. Причем их накопление в середине между отверстиями наблюдается лишь в определенный момент времени (для пластины с отверстиями 0.5 мм пластические деформации появляются через 0.008 с после начала охлаждения и их величина равна $0.867 \cdot 10^{-3}$). Здесь процесс падения сжимающих напряжений в середине между отверстиями и формирования растягивающих напряжений сопровождается появлением пластических деформаций. Максимальной величины пластические деформации на охлаждаемых по-

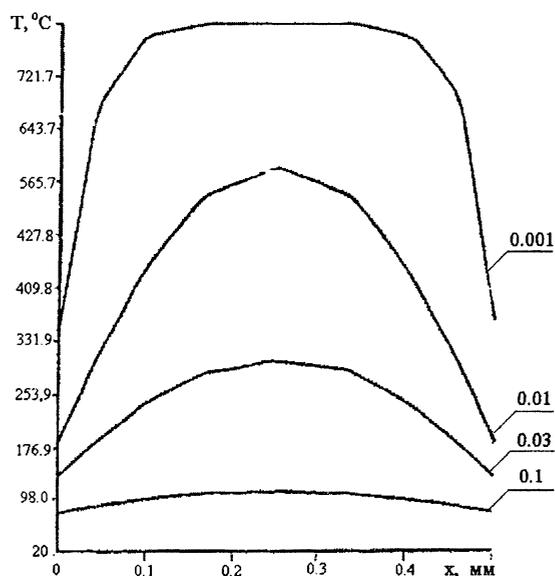
верхностях достигают при радиусе отверстий 0.5 мм и равны $5.57 \cdot 10^{-3}$, а по мере того как увеличивается радиус, их величина на поверхности отверстия уменьшается.

Рассмотрим задачу второго типа, когда зафиксирован радиус отверстий: $R = 0.5 \text{ мм}$. Тогда в зависимости от расстояния между отверстиями меняется размер пластины. Пусть $2L$ - расстояние между центрами окружностей. Тогда расстояние между отверстиями равно $2(L - R)$ и для этой величины выбраны следующие значения: $0.5, 1, 1.5, 2 \text{ мм}$.

В результате решения температурной задачи были получены зависимости для температуры, представленные на рис. 9 и 10. Рис. 9 иллюстрирует распределение температуры во времени для пластины с расстоянием между отверстиями, равным 0.5 мм . Кривые соответствуют изменению температуры на охлаждаемой поверхности (tp) и в середине отрезка AB (ts). Из графика видно, что температура на поверхности отверстий практически мгновенно становится равной температуре охлаждающей жидкости. Процесс остывания данной пластины протекает менее 1 с , в то время как для пластин с отверстиями $1, 1.5$ и 2 мм он длится соответственно $1.4, 5$ и 7 с .



Р и с. 9. Изменение температуры в зависимости от времени для пластины с расстоянием между отверстиями, равным 0.5 мм

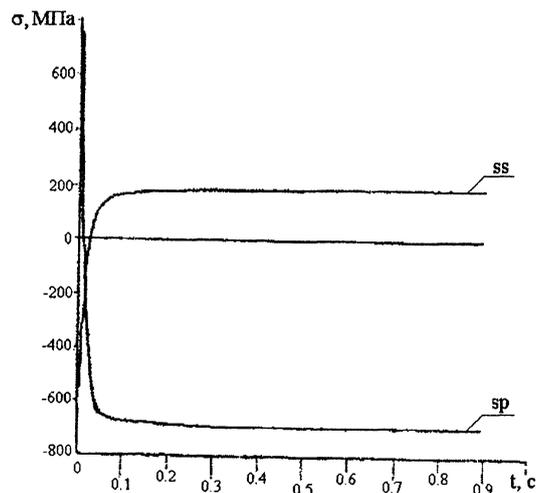


Р и с. 10. Распределение температурных полей в пластине с длиной отрезка между отверстиями, равной 0.5 мм

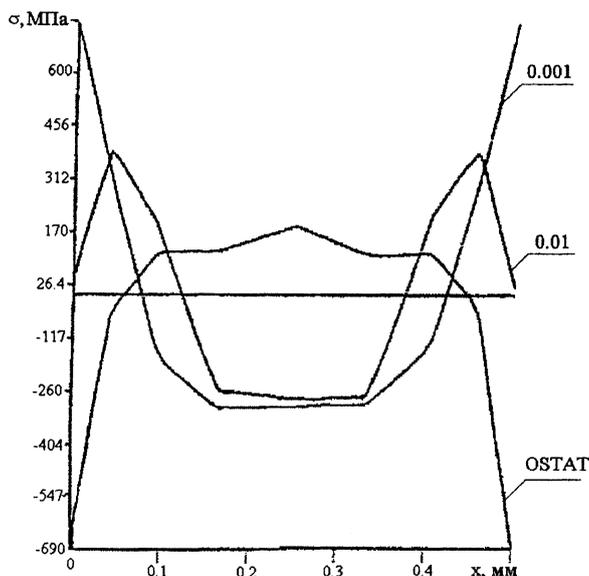
На рис.10 представлено распределение температуры в точках рассматриваемого отрезка AB для пластины с величиной $2(L - R) = 0.5 \text{ мм}$. Графики температур для пластин с другим расстоянием между отверстиями аналогичны представленному. При анализе полученных результатов можно сделать вывод, что процесс охлаждения образца интенсивнее идет при малом расстоянии между отверстиями. Также можно отметить, что для пластины с расстоянием между отверстиями 2 мм характерны эпюры с более высоким градиентом температур вблизи охлаждаемых поверхностей, т.е. разность температуры между поверхностью и в точке, соответствующей середине отрезка AB , возрастает при увеличении величины $2(L - R)$.

Результаты решения задачи определения остаточных напряжений для пластины с расстоянием между отверстиями, равным 0.5 мм , показаны на рис. 11 и 12. Рис. 11 иллюстрирует процесс формирования напряжений $\sigma = \sigma_y$ во времени. В начальный момент охлаждения идет быстрое остывание поверхностных слоев. Они стремятся сократить свою площадь до первоначальной, а неостывшая сердцевина оказывает этому процессу сопротивление. Поэтому на охлаждаемой поверхности можно наблюдать наличие растягивающих напряжений, тогда как в середине между отверстиями образуются напряжения сжатия. По мере уменьшения температуры по сечению изделия происходит падение напряжений за счет появления пластических деформаций и с момента времени $t = 0.05 \text{ с}$ на поверхности формируются сжимающие напряжения, максимальная величина 690.9 МПа которых достигается, когда изделие остывает до тем-

пературы охлаждающей жидкости. Данный процесс формирования остаточных напряжений характерен и для пластин с другими расстояниями между отверстиями. Различие заключается лишь в величине напряжений и длительности процесса.



Р и с. 11. Распределение напряжений для пластины с расстоянием между отверстиями, равным 0.5 мм, в зависимости от времени



Р и с. 12. Распределение напряжений в пластине с длиной отрезка между отверстиями, равной 0.5 мм

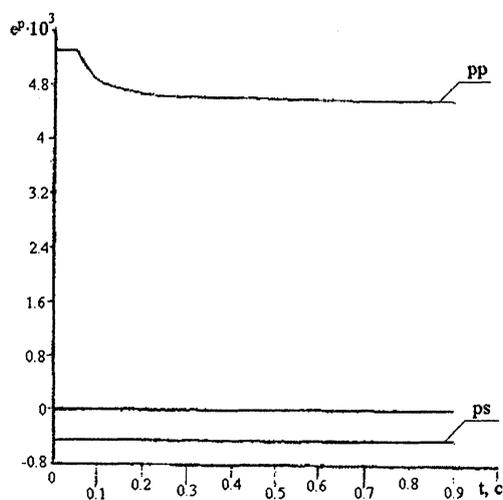
На рис. 12 представлено распределение напряжения $\sigma = \sigma_y$ в точках рассматриваемого отрезка для разных моментов времени (время указано в секундах). Из анализа полученных графиков видно, что вид эпюры остаточных напряжений качественно одинаков для всех рассматриваемых случаев. Также можно отметить, что на величину напряжений сжатия значительное

Т а б л и ц а 4
Влияние величины $2(L - R)$ на глубину проникновения остаточных напряжений

$2(L - R)$, мм	H , мм	$H / 2(L - R)$
0.5	0.057	0.114
1	0.155	0.155
1.5	0.236	0.157
2	0.313	0.157

влияние оказывает величина $2(L - R)$. Ее увеличение приводит к росту абсолютной величины остаточных напряжений, максимальное значение которой достигается при $2(L - R) = 2$ мм и равно 724.3 МПа.

Влияние величины длины отрезка AB на глубину проникновения напряжений сжатия представлено в табл. 4. Из анализа данных табл. 4



Р и с. 13. Распределение пластических деформаций в зависимости от времени для пластины с расстоянием между отверстиями, равным 0.5 мм

видно, что с увеличением расстояния между отверстиями возрастает и величина проникновения остаточных напряжений в глубь изделия. Также было отмечено, что с ростом величины $2(L - R)$ увеличивается и значение $H / 2(L - R)$, а значит упрочнение существенно для пластин с любым расстоянием между отверстиями, но для $2(L - R) > 1$ влияние упрочнения снижается.

На рис. 13 и 14 представлены результаты решения задачи определения пластических деформаций для пластины с величиной $2(L - R)$, равной 0.5 мм. Информация, представленная на рис. 13, иллюстрирует процесс формирования пластических деформаций $e^p = e_y^p$ во времени.

Кривая pp соответствует изменению деформаций в точках, лежащих на охлаждаемых поверхно-

стях, а кривая p_s показывает распределение деформаций для точки, лежащей в середине между отверстиями. Из графика видно, что на первом этапе охлаждения пластические деформации интенсивно растут вслед за резким остыванием поверхности. Затем их накопление прекращается ($t = 0.002c$), а начиная со времени $t = 0.06c$, на поверхности возникают вторичные пластические деформации, которые в конце процесса охлаждения достигают значения, равного $4.83 \cdot 10^{-3}$. Рост деформаций в середине между отверстиями также наблюдается в первые моменты охлаждения, а с момента времени $t = 0.004c$ их рост прекращается и их величина равна $0.676 \cdot 10^{-3}$. Такое поведение пластических деформаций характерно и для других пластин.

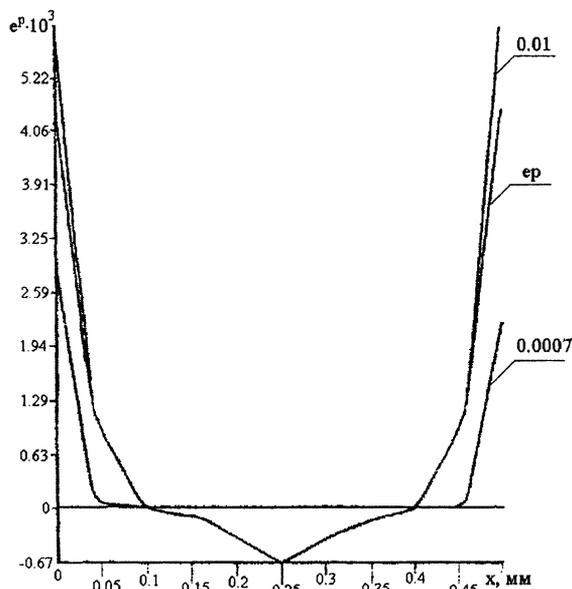
На рис. 14 представлено распределение пластических деформаций $e^p = e_y^{def}$ в различные моменты времени. Цифрами на графиках указаны соответствующие рассматриваемые моменты времени в секундах.

Из рисунка видно, что пластические деформации наблюдаются и в середине между отверстиями, как это было отмечено и в других случаях. С увеличением $2(L - R)$ величина деформаций растет, и максимального значения на поверхности они достигают в пластине с расстоянием между отверстиями 2 мм и равны $6.13 \cdot 10^{-3}$, т.е. их величина увеличивается с ростом величины $2(L - R)$.

В результате исследования о влиянии ТПУ на формирование и распределение температурных и механических полей в пластине с двумя отверстиями можно сделать вывод, что при заданном режиме упрочнения (начальная температура разогрева изделия $T_0 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$, температура охлаждающей жидкости $T_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) и приведенных выше значениях теплофизических и механических свойств материала (сплав ЭИ698) наиболее благоприятное поле остаточных напряжений и пластических деформаций создается при радиусе отверстий, равном 0.5 мм , и расстоянии между отверстиями, равном 1 мм .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка методов и средств оценки состояния деталей машин, остаточного ресурса и технологических процессов формоизменения : Отчет о НИР / Самар. политехн. ин-т; Руковод. Ю.П. Самарин. № 029.30001271. Самара: Самар. политехн. ин-т, 1992. 168с.
2. Лиманова Л.В. Расчет тепловых и механических полей при термопластическом упрочнении пластины, цилиндра малой высоты, пластины с цилиндрическим отверстием с учетом зависимости свойств материала от температуры /; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 1998. 37 с: ил.-Библиогр. 1 назв. Деп. в ВИНТИ 18.09.98., №2820-В98.



Р и с. 14. Распределение пластических деформаций в пластине с длиной отрезка между отверстиями, равной 0.5 мм