ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПИЛ ПО ИЗВЕСТНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СХЕМАМ

Мухамедов Азад Анварович
т.ф.н.доцент Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Бегатов Жахонгир Мухаммаджонович
PhD доцент Совместного Белорусско-Узбекского межотраслевого института прикладных технических квалификаций в городе Ташкенте
Ташкент, Узбекистан
Хожиев Олимжон Бегалиевич
Докторант Совместного Белорусско-Узбекского межотраслевого института прикладных технических квалификаций в городе Ташкенте
Ташкент, Узбекистан
E-mal: xojiyevolimjon@gmail.com

Аннотация: В статье рассматриваются особенности термической обработки пил, применяемые в современном инструментальном производстве. Приведены известные технологические схемы закалки, отпуска и стабилизации пил из различных марок инструментальных сталей. Особое внимание уделено влиянию режимов нагрева и охлаждения на структуру и эксплуатационные свойства режущей части инструмента. Проанализированы преимущества и недостатки традиционных и современных методов термообработки, включая применение индукционного и вакуумного нагрева. Приводятся рекомендации по выбору оптимальных параметров технологического процесса с целью повышения износостойкости и срока службы пил.

Ключевые слова: термическая обработка, пила, закалка, отпуск, структура стали, износостойкость.

Annotasiya: Ushbu maqola zamonaviy asbobsozlikda qo'llaniladigan arra issiqlik bilan ishlov berishning o'ziga xos xususiyatlarini o'rganadi. Unda turli xil asbob po'latidan yasalgan arralarni qattiqlashtirish, chiniqtirish va barqarorlashtirish uchun taniqli texnologik oqim jadvallari keltirilgan. Asbobning kesish qirrasining tuzilishi va ishlash xususiyatlariga isitish va sovutish sharoitlarining ta'siriga alohida e'tibor qaratilgan. Induksion va vakumli isitishdan foydalanishni o'z ichiga olgan an'anaviy va zamonaviy issiqlik bilan ishlov berish usullarining afzalliklari va kamchiliklari tahlil qilingan. Arralarning asinma bardoshliligi va xizmat muddatini yaxshilash uchun optimal jarayon parametrlarini tanlash bo'yicha tavsiyalar berilgan.

Kalit so'zlar: issiqlik bilan ishlov berish, arra, chiniqtirish, chiniqtirish, po'lat konstruktsiyasi, asinma bardoshlilik.

ISSN 3030-3907

Annotation: This article examines the specifics of saw heat treatment used in modern toolmaking. It presents well-known process flow charts for hardening, tempering, and stabilizing saws made from various grades of tool steel. Particular attention is paid to the influence of heating and cooling conditions on the structure and performance properties of the tool's cutting edge. The advantages and disadvantages of traditional and modern heat treatment methods, including the use of induction and vacuum heating, are analyzed. Recommendations are provided for selecting optimal process parameters to improve wear resistance and service life of saws.

Keywords: heat treatment, saw, hardening, tempering, steel structure, wear resistance.

Введение

Индукционный импульсный нагрев пил у впадины зуба до температуры 900 0С, при линейном распределении температуры по радиусу, означает, сто общая зона нагрева пилы по радиусу достигает 8 мм от впадины зубьев. При этом по глубине до 2 мм нагрев идет выше Ac1 (аустенитно состояние), а на глубине более 2 мм температура ниже точки фазового превращения.

Распределение температур и эпюра возникающих напряжений приведены на рис. 1.1. Как видно из рис 1.1а. $\int_{\tau}^{\tau} T2d2$ легко подсчитать на ЭВМ, используя численные методы, в частности методами прямоугольников или трапеций. Для этого при составлении программы пришлось учесть изменения коэффициентов линейного расширения и модуля упругости по глубине прогреваемой зоны пилы.

В большинстве приведенных в данной работе программ для удобства расчетов вычисление определенного интеграла $\int_{\tau_1}^{\tau} \mathrm{T}^{\tau} d\tau \,.\frac{E\propto}{1-\mu}$ в соотношениях (1) и (2) приводится в виде отдельной подпрограмма. Второй цикл расчетов учитывает (уже по известному полному интегралу) расчет интеграла текущего радиуса и возникающие термические напряжения $\int_{\tau_1}^{\tau} \mathrm{T}^{\tau} d\tau \,.\frac{E\propto}{1-\mu}$ и 6_2 , 6_8.

Как видно из приведенной эпюры напряжений (см. рис. 1.1), в зоне нагрева окружные напряжения далеко превышают предел текучести стали как в области аустенитно го состояния, так в области температур ниже фазового превращения. В аустенитно области должна пройти релаксация напряжений, хотя как это будет показано ниже, очень быстрый импульсный нагрев за 0,8 сек. оставляет не релаксированными напряжения 250-450 Мпа. Если учесть, что при температуре 240-350 ^{0}С предел текучести стали Х12М в состоянии поставки не превышает 1000 Кпа, то выходит, что на глубине до 6

ISSN 3030-3907

мм от впадины зубьев напряжение превышает предел текучести. Следовательно, будет протекать пластическая деформация и релаксация напряжений. После закалочного охлаждения сокращение объема на глубине 2 мм будут компенсироваться ростом объема за счет мартенситного превращения. На других глубинах такой компенсации нет и при охлаждении коробления неизбежны. Эксперименты подтвердили расчеты – все пили после термической обработки имели «твердость» до 3-4 мм.

Последующая рихтовка пил также маловероятна, т.к. она возможно только при отпуске под напряжением закаленной стали при достаточно высокой температуре. В отпущенном же или горячекатаном состояниях (т.е. в зонах глубже 2 мм от впадины зубьев) стали плохо поддаются рихтовке.

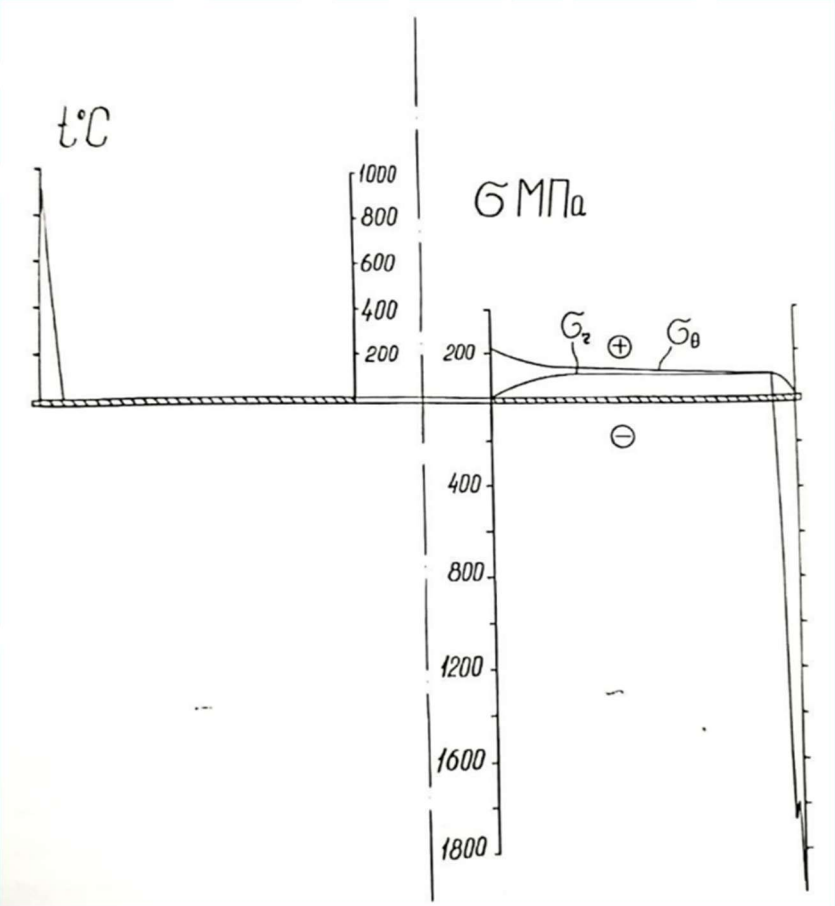


Рис. 1.1. Напряженная в диске после закалки без предварительного подогрева.

1.1.1. Разработка новых схем индукционной закалки

Результаты, полученные при использовании импульсного индукционного нагрева и закалки периферии пил показывают, что обычные схемы не пригодны, т.к. вызывают коробления дисков. Для устранения коробления следовало-бы: во-первых, исключить возникновение термических напряжений, превышающих предел текучести незакаленных зон, во-вторых, в закаленной периферийной зоне термические напряжения уравновесить структурными. Это возможно, если уменьшить температурные

ISSN 3030-3907

перепады в процессе нагрева и охлаждения. Для этого термически обрабатываемые пилы предварительно подогревали либо в печи вместе с фальц-дисками, либо в нагретых фальц-дисках до различных температур 400^0C, 450^0C, 500^0C, 550^0C. Однако при установке в индуктор наружная поверхность пил, выходящая за пределы фальш-дисков, охлаждалась быстрее, а внутренняя поверхность (со стороны отверстия пилы) также охлаждалась быстрее из-за теплоотдачи на валу закалочного приспособления. Затем включалась установка, проходил индукционный нагрев в течении 0,8 сек, спрейерное охлаждение и само отпуск закаленной периферии за счёт более нагретой части пилы и фальш-дисков. Для оценки напряженного состояния пилы проводились замеры температур пилы по радиусу на каждой операции. Результаты замеров приведены в таблице 1.1.

Зная закономерности изменения температур, по известным уже формулам можно рассчитать эпюры термических напряжений. Расчеты также проводили на ЭВМ; построение блок-схем расчетов и составление программ проводились уже по описанным методикам. Все эти данные приведены в приложении2, а эпюры на рис 1.1-1.1.2

Таблица-1.1

Изменение температуры различных зон пилы при термообработке с предварительным подогревом

Расстояние от впадины зубьев	Температура, ^{0}C				
	перед закалкой	нагрев под закалку	сразу после закалки	через 2 мин.	через 12 мин.
1	2	3	4	5	6
Подогрев 400^0C					
0	253	1000	20	165	122
15	308	308	80	198	132
45	308	308	308	253	176
75	319	319	319	258	121
96	308	308	304	264	143
130	280	280	280	190	120
Подогрев 450^0C					
0	253	1000	20	198	126
15	313	313	90	220	137
45	363	363	357	297	165
75	346	346	341	264	148
96	340	340	320	240	148
130	310	300	290	198	120

ISSN 3030-3907

Подогрев 500^{0}C					
0	275	1000	20	200	130
15	330	330	90	231	132
45	374	374	370	330	170
75	440	440	430	324	165
96	396	396	396	310	154
130	275	275	330	280	140
Подогрев 550^{0}C					
0	286	1000	20	198	154
15	420	420	120	242	152
45	462	462	455	360	219
75	451	451	441	-	181
96	434	434	430	-	165
130	420	420	410	320	154

Как видно из представленных рисунков, при импульсном нагреве по закалку во впадине зубьев пилы температура достигает 1000^{0}C, а зона образования аустенита доходит до 2 мм ниже впадины зубов. Термические напряжения превышают возможный уровень предела текучести аустенита, равный 250-400 МПа, т.е., предполагается, что при импульсном нагреве напряжения полностью не релаксируют, а будут в указанном интервале [3].

Термические напряжения за пределами аустенитно зоны, т.е. на расстояниях ниже 2 мм от впадины зуба существенно зависят от температуры предварительного подогрева пилы. (см. рис. 1.1-1.2 и табл. П.3). Например, на глубине 3 мм от впадины зубьев термические напряжения, возникающие при нагреве под закалку, были (таблица 1.2.)

Таблица 1.2.

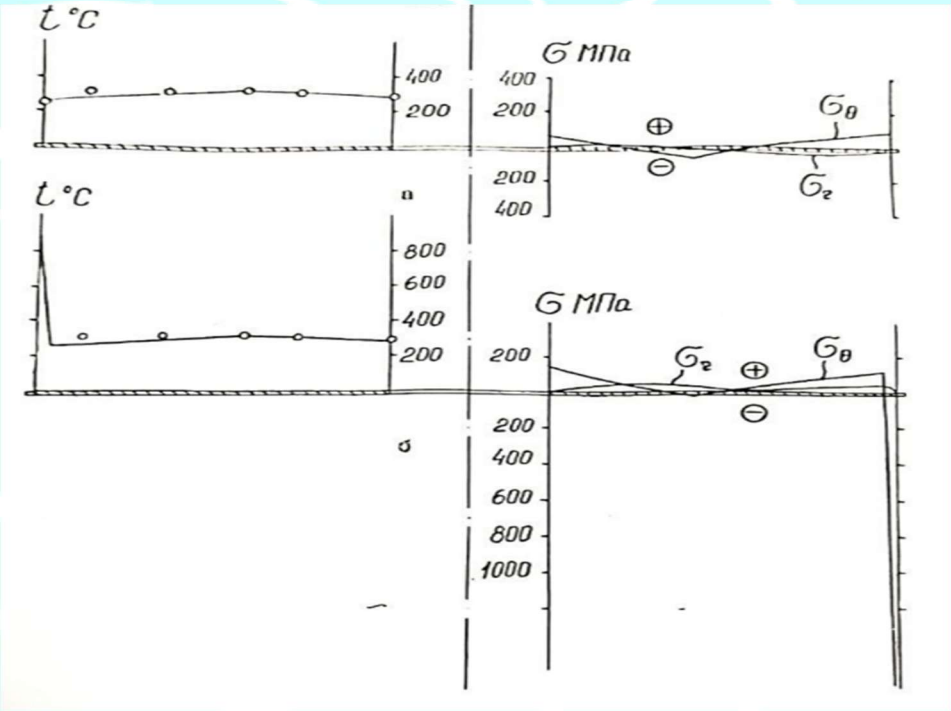
Уровень максимальных тангенциальных напряжений за пределами аустенитно зоны при нагреве пил под закалку

Подогрев пил, ^{0}C	Температура на расстоянии 3 мм от впадины зуба, ^{0}C	Максимальные тангенциальные напряжения, МПа
400	550	653
450	550	600
500	550	460
550	550	393

По справочным данным /1/ предел текучести стали Х12М со структурой троосто-сороито при температуре около 550^{0}C составляет 450

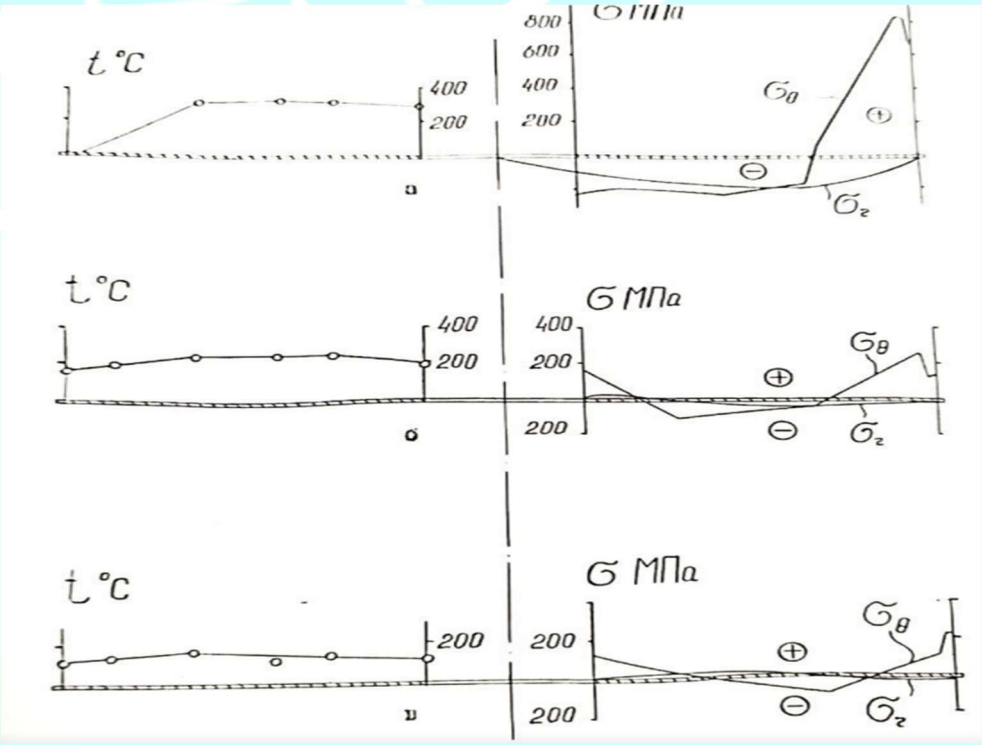
ISSN 3030-3907

МПа, а сталей марок 65Г и 70Г в нормализованном состоянии 30 МПа. Отсюда можно сделать вывод:



а – подогрев б – нагрев под закалку

Рис. 1.2. Напряжение в диске при термообработке с предварительном подогревом 400 ^{0}C.



а – закалочное охлаждение б – само отпуск 2 минуты в – само отпуск 12 минут

Рис. 1.3. Напряжения в диске при термообработке с предварительным подогревом 400 ^{0}C.

ISSN 3030-3907

1. Для устранения возможного пластического деформирования при нагреве под закалку участков, привыкающих к аустенитной зоне необходим подогрев пил выше 450 ^{0}C.

2. Для вышеуказанной технологии необходимо использовать стельную ленту с троосто-сороитной структурой, либо с холодной заготовкой.

Подача охлаждающей воды из спрейера в нагретую зону для проведения закалки ведет к резкому охлаждению закаливаемой части и значительному охлаждению центральных зон. Происходит изменение знака и уровня термических напряжений. Максимальные тангенциальные напряжения возникают на расстоянии 5 мм от впадины зубьев, где температура сразу после охлаждения близка к комнатной (таблицы 1.3 и табл. П.2).

Таблица 1.3

Уровень максимальных тангенциальных напряжений за пределами закаленной зоны при закалочном охлаждении

Подогрев пил, ^{0}C	Максимальное тангенциальное напряжение, МПа
400	830
450	890
500	1020
550	1110

Предел текучести сталей 65Г, 70Г в холоднокатанном состоянии или термообработанном на структуру троостосорбита составляет примерно 1000 МПа. Поэтому можно сделать вывод:

1. Для устранения возможной пластической деформации при закалочной охлаждении участков, примыкающих к закаленной зоне, необходим подогрев пил перед закалкой не выше 500 ^{0}C.

2. Для изготовления пил необходимо применение сталей с достаточно высоким пределом текучести (холоднокатанная лента или лента термообработанная).

3. Дальнейшее снижение термических напряжений возможно при более точном дозированном охлаждении центральных зон пилы в процессе закалочного охлаждения с целью температурных перепадов по радиусу ее.

После прекращения закалочного охлаждения проходит само отпуск пилы за счет нагретой части и уже через 2 минуты температуры пилы в значительной мере выравнивается, а температура самоотпуска в закаленной части достигает 200^{0}C.

ISSN 3030-3907

Как уже указывалось выше, при импульсном нагреве периферии пил под закалку возможный нижний уровень не релаксированных сжимающих напряжений составляет 250 МПа. После закалки эти напряжения суммируются с термическими, возникающими при охлаждении. Это обстоятельство учитывалось при расчете напряжений в теле пилы, рассматривая закаленную пилу как составную: внутренней незакаленные диск, на который надето закаленное кольцо (рис 7.13). В этом случает находят контактное давление на поверхность внутреннего диска через напряжения в наружном кольце.

Согласно:

$$6_2 = \frac{-\tau_3^2}{\tau_2^2-\tau_3^2}\left(1+\frac{\tau_2^2}{\tau_3^2}\right).p \quad (1)$$

Где p – наружное контактное давление на внутренний диск, τ_2 и τ_3 – наружный и внутренний радиусы кольца

Откуда

$$6_2 = \frac{-6_2*(\tau^2-\tau_{3)}^2}{\tau_3^2(1+\frac{\tau_1^2}{\tau_2}} = \frac{-250*(160^2-158_{3)}^2}{158_3^2(1+\frac{160_1^2}{160}} = 3{,}2 \text{ МПа.}$$

Однако в закаленном наружном кольце при закалке возникают структурные напряжения, вызванные объемными изменениями при мартенситном превращении. Само отпуск также сопровождается объемными изменениями, связанными уже со снижением тетрагональной мартенсита. В конечном итоге, при окончательном охлаждении пилы при отсутствии пластического течения внутреннего диска, устойчивость пилы против коробления зависит от уровня структурных напряжений. Рассмотрим все напряжения, возникающие при закалке наружного кольца, которые и являются определяющими устойчивость пилы против коробления.

Глубина закаленной зоны (наружного закаленного кольца) составляет 2 мм. Следовательно, внутренний диаметр кольца τ_3 = 153 мм.

Напряжения, возникающие в закаливаемом кольце и внутреннем диске:

1. Термические напряжения в кольце 1, вызванные охлаждением от закалочной температуры на глубине 2 мм. При охлаждении от 865 (как средняя на глубине 2 мм) до точки начала мартенситного превращения стали Х12М = 230 можно подсчитать:

Относительное сужение

где $\alpha_{ауст.}$ – коэффициент линейного расширения аустенита,

ΔT_1 – разница температур от 865 до 230 ^{0}С.

$$E_1 = 24*10^{-6}*(865-230) = 0{,}01524$$

Уменьшение радиуса кольца τ_3 = 158 мм в результате охлаждения составит:

$$\Delta \tau_3 = E_1 * \tau_3 = 0{,}01524 * 158 = 2{,}4 \text{ мм}$$

ISSN 3030-3907

Тогда контактное давление согласно

$$\rho_1 = \frac{\Delta\tau_3}{\tau_3\left(\mathrm{C_1} / E_1 + {}^{\mathrm{C}_2}/_{E_2}\right)}$$

Где E_1 и E_2 – модули упругости диска 2 и кольца 1,
C_1 и C_2 – коэффициенты Ляме

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{\tau_1}{\tau_3}\right)^2}{1 - \left(\frac{\tau_1}{\tau_3}\right)^2} - \mu = \frac{1 + \left(\frac{30}{158}\right)^2}{1 - \left(\frac{30}{158}\right)^2} - 0{,}3 = 0{,}774$$

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{\tau_1}{\tau_3}\right)^2}{1 - \left(\frac{\tau_1}{\tau_3}\right)^2} + \mu = \frac{1 + \left(\frac{30}{158}\right)^2}{1 - \left(\frac{30}{158}\right)^2} + 0{,}3 = 0{,}774$$

$$P_1 = \frac{2{,}4}{158\left(\frac{0{,}774}{21{,}7} * 10^4 + \frac{79{,}8}{11{,}0} * 10^4\right)} = 20{,}9\ М\text{Пф}$$

2. Структурные напряжения в кольце 1.

При мартенситном превращении от $M_{н.}$ = 230^{0}C до 20^{0}C наблюдается рост объема

$$\varepsilon_2 = \frac{V_{m20} - V_{\text{ɣ}}}{3V_{\text{ɣ}}}$$

Где V_M - удельный объем мартенсита при 20 ^{0}C,
$V_З$ - удельный объем аустенита при 230^{0}C,

Эти значения находят по уравнениям Юрьева С.Ф. в зависимости от концентрации углерода C_p и температуры t:

$V_{M2,0}$ = 0,12708 + 4,48 * 10^{-6} * t + 2,79 * 10^{-3} C_p = 0,12708 + 4,48 * 10^{-6} *20 + 2,79 * 10^{-3} 0,7 = 0,1291

$V_з$= 0,12282 + 8,56 * 10^{-6} * t + 2,15 * 10^{-3} C_p = 0,12282 + 8,56 * 10^{-6} * 230 + 2,15 * 10^{-3} 0,7 = 0,1263

$$\varepsilon_2 = \frac{0{,}1291 - 0{,}1263}{3 \cdot 0{,}1263} = 0{,}0074$$

Увеличение радиуса τ_3 = 158 в результате мартенситного превращения:

$$\Delta\,\tau_3 = E_2 * \tau_3 = 0{,}0074 * 158 = 1{,}1692 \text{ мм}$$

Тогда контактное давление на

$$P_2 = -\frac{\Delta\tau_3}{\tau_3(C_1/E_1 + C_1/E_2} = -\frac{1{,}1692}{158 \cdot \left(\frac{0{,}774}{21} \cdot 10^4 + \frac{79{,}3}{21} \cdot 10^4\right)} = -19{,}4\text{МПа}$$

3. Контактное давление из-за не релаксированных сжимающих напряжений, как уже показало выше

$P_{3_}$ = -3,2 МПа

4. Общее контактное давление:

ISSN 3030-3907

$$P_{общ_} = P_1 – P_2 – P_3 = {}_{20}9\text{-}19{,}4\text{-}3{,}2\text{=-}1{,}7 \text{ МПа}$$

Следовательно, сразу после закалки в закаленном кольце 1 возникает сжимающие напряжения, уравновешиваемые растягивающими напряжениями в диске 2. В связи с этим в программы расчета напряжений в диске 2 было введено значение контактных напряжений, имеющихся на наружной поверхности диска 2 $P_{общ_}$ = -1,7 МПа

При разжимании фальш-дисков сразу после закалки наблюдается искривление пил в виде «восьмерки», что говорит о том, что уровень сжимающих напряжений в наружном закаленном кольце выше критического. При само отпуске в течении 2-х минут пила либо выравнивается, либо еще имеет искривление. После само отпуска в течении 12 минут можно наблюдать выравнивание пил. Вызвано это тем, что при само отпуске происходит уменьшение тетрагональной мартенсита и уменьшение объема. Эксперименты со сталями с содержанием углерода 0,7-0,85 показали, что уменьшение линейных размеров при 200^0C после закалки соответствует относительному сокращению диаметра E_3= 0,0012. Тогда уменьшение радиуса τ_3 = 158 мм составит:

$$\Delta \tau_3 = E3 * \tau_3 = 0{,}0012 * 158 = 0{,}189 \text{ мм}$$

$$P_4 = \frac{\Delta\tau_3}{\tau_3 \cdot (C_1/E_1 + C_1/E_2)} = \frac{0{,}184}{158 * (\frac{0{,}774}{21} * 10^4 + \frac{79{,}3}{21} * 10^4)} = 3{,}1\ МПа$$

Контактное давление

Таким образом, после само отпуска в течении 12 минут формируется контактное давление:

$$P=P_{общ_} + P_4 = .1{,}7+3{,}1= 1{,}4 \text{ МПа}$$

В соответствии с этим в программы расчета напряжений после 12 мин. Самоотпуска было введено значение контактного давления P= 1,4 МПа (приложение 2) на внутренний диск 2.

После полного остывания, при отсутствии пластического деформирования в процессе нагрева-охлаждения, т.е. если все деформации диска 2 оказались упругими и обратимыми, остается влияние только контактного давления наружного кольца 1 на внутренний диск 2. Этим условием (отсутствия пластического течения в процессе нагрева-охлаждения) отвечает термическая обработка с предварительным подогревом пил 500^0C и, возможно, 450^0C. Для этих случаев представлены эпюры напряжений в теле пилы окончательного охлаждения [2].

Однако даже в этих случаях плоскостность пил может быть гарантирована, если контактное напряжение не превышает критического.

Если представить внутренний диск 2 (см. рис 1.4) нагруженными по периферии контактным напряжением, те критическое напряжение равно:

ISSN 3030-3907

$$P_{кр} = K\frac{D}{b^2 * h}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

Здесь

Где E – модуль нормальной упругости, $21*10^4$ МПа

h – толщина диска – 0,95 мм

μ - коэффициент Пуассона – 0,3

$$D = \frac{21 * 10^4 * 0.95^3}{12 * (1 - 0{,}3^2)} = 16000$$

Значение коэффициента К в (7.3) зависит от способа закрепления пластины и для шарнирного опирания по наружному краю (т.е. в свободном состоянии) согласно равно 2,73.

$$P_{кр} = 2{,}73 \cdot \frac{16000}{158^2 \cdot 0{,}95} = 1{,}8МПА$$

Тогда

В нашем случае сжимающее контактное напряжение Р после закалки и самоотпуска составляло 1,4МПа, т.е. не превышало критического значения.

Максимальные напряжения найдем из условия, что после самоотпуска Р не превышает $Р_{кр}$ = - 1,3 МПа (иначе пилы искривлялись бы всегда)

Тогда сразу после закалки

$$P = -1{,}8 - P_4 = -1{,}8 - 3{,}1 = -4{,}9 \text{ Мпа}$$

$$G_a = \frac{P * \tau_3^2}{\tau_2^2 - \tau_3^2} * \left(1 + \frac{\tau_2^2}{\tau^2}\right) = \frac{-4{,}9 * 158^2}{160^2 - 158^2}\left(1 + \frac{160^2}{160^2}\right) = -384\ МПа$$

Минимальные тангенциальные напряжения найдем из условия, что после само отпуска Р = $Р_{кр}$ = 1,8 МПа

Сразу после закалки Р = 1,8 – 3,1 = -141,3 МПа

$$G = \frac{-1{,}3 * 158^2}{160^2 - 158^2}\left(1 + \frac{160^2}{160^2}\right) = -141{,}3\ МПа$$

Таким образом, нереклаксированные окружные (тангенциальное) напряжения в случае получения плоских пил без коробления находится после нагрева по закалку [1]. В других случаях будет наблюдаться потеря устойчивости и образование после окончательного охлаждения либо «тарельчатой», либо искривление «восьмеркой». Как нами было показано выше, наиболее вероятный уровень не релаксированных тангенциальных напряжений = 250 МПа.

Заключение

В результате рассмотрения известных технологических схем термической обработки пил установлено, что правильно выбранные режимы

ISSN 3030-3907

нагрева, выдержки и охлаждения оказывают решающее влияние на эксплуатационные свойства инструмента. Оптимизация процессов закалки и отпуска позволяет достичь необходимого сочетания твердости, износостойкости и вязкости стали, что существенно повышает срок службы пил и качество реза.

Сравнительный анализ существующих методик показал, что применение современных технологий — таких как индукционный нагрев, контролируемая атмосфера и ступенчатое охлаждение — обеспечивает более стабильные результаты по сравнению с традиционными методами. При этом важным остается строгий контроль параметров процесса и выбор термообработки в зависимости от марки стали и назначения пилы.

Таким образом, совершенствование технологических схем термической обработки является ключевым направлением повышения надежности и долговечности пил, а также эффективности их промышленного применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

5. Леппле Фолькер Термическая обработка стали. Учебник 2021 г.
6. Колеров, В. С. Уварова Термическая обработка сталей: метод. указания /. аэрокосм. ун-т, 2008. - 68 с.
7. Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секей Технология термической обработки стали 2022.
8. Бегатов Д.М., Норходжаев Ф.Р., Мухкамедов А.А. Влияние экстремальных температур отпуска и последующей закалки на формирование структуры и свойства штамповых сталей. Международный журнал передовых исследований в области науки, техники и технологий, том 6, выпуск 4, апрель 2019 г.

ISSN 3030-3907