Количественные оценки вкладов различных механизмов в прочность сплавов

Исполнитель,
студент гр. 622671 Н.Е. Кайнова

Научный руководитель
к.т.н. доцент каф. ФММ И.В. Тихонова

Прочностные характеристики железа и стали [1]

Материал, его характеристика	Достигнутый уровень прочности, МПа	
	$\sigma_т$	$\sigma_в$
Железо высокой чистоты $(C+N) < 10^{-7}$ %, монокристалл	20—30	50
Железо техническое, поликристалл	100—150	200
Сталь малоуглеродистая, <0,2 % C, горячекатаная	250	400
Сталь низколегированная малоуглеродистая, нормализованная (типа 16Г2АФ)	400	600
Сталь среднеуглеродистая, 0,3—0,4 % C, закалка с отпуском	600	800
Сталь углеродистая, эвтектоидная, закалка с отпуском	800	1000
Сталь легированная среднеуглеродистая (типа 40ХН, 30 ХГСА):		
закалка с высоким отпуском	1000	1300
закалка с низким отпуском	1500	1800
Сталь легированная дисперсионно-твердеющая (типа 40Х5МФ), закалка с отпуском	2000	2200
Сталь легированная, термомеханическая обработка	2500—3000	3000—3500
Сталь легированная, патентированная, холоднотянутая проволока	—	4800—5200
Нитевидные кристаллы железа (усы)	10000—13000	—

Цель работы

Оценка вкладов в упрочнение материалов отдельных механизмов при варьировании ответственных за прирост характеристик прочности структурных параметров.

Поставленные задачи.

1. Проанализировать физическую природу основных механизмов упрочнения и описать математические модели, используемые для количественных оценок.

2. Оценить прирост напряжения течения α- и γ-железа при изменении плотности дислокаций в диапазоне 10^6 - 10^{12} $см^{-2}$. Деформационное упрочнение γ-Fe сильнее, чем α-Fe.

3. Установить эффективность твердорастворного упрочнения феррита различными элементами замещения: Mo, Cr, Si, Mn, Ti, V, Ni.

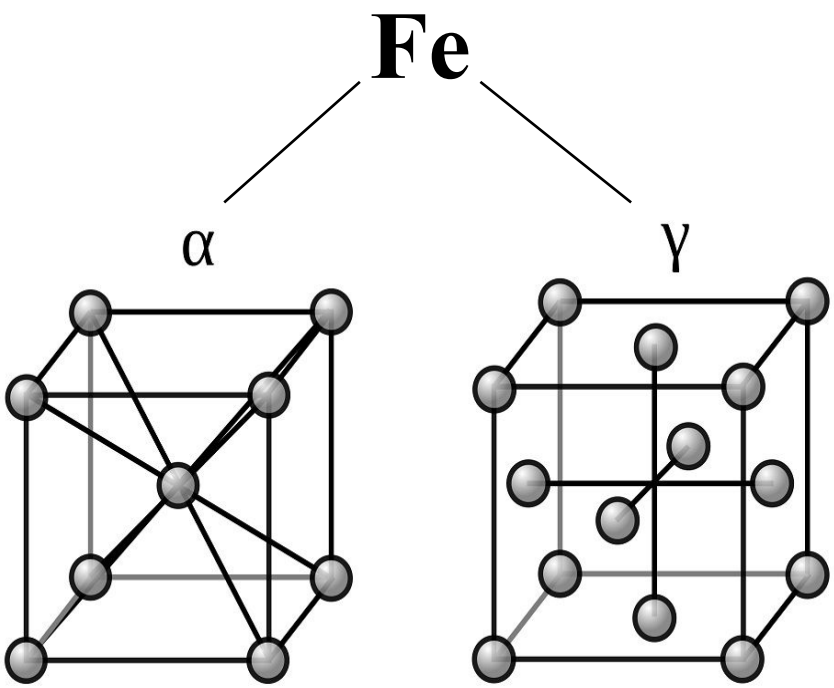
4. Оценить прирост напряжения течения α-Fe при изменении размера зерна, ячеек и субзерен в диапазоне 0,01-100 мкм.

5. На основании расчета прироста напряжения течения железа при варьировании размеров и расстояний между частицами различных нитридов установить наиболее перспективный упрочнитель.

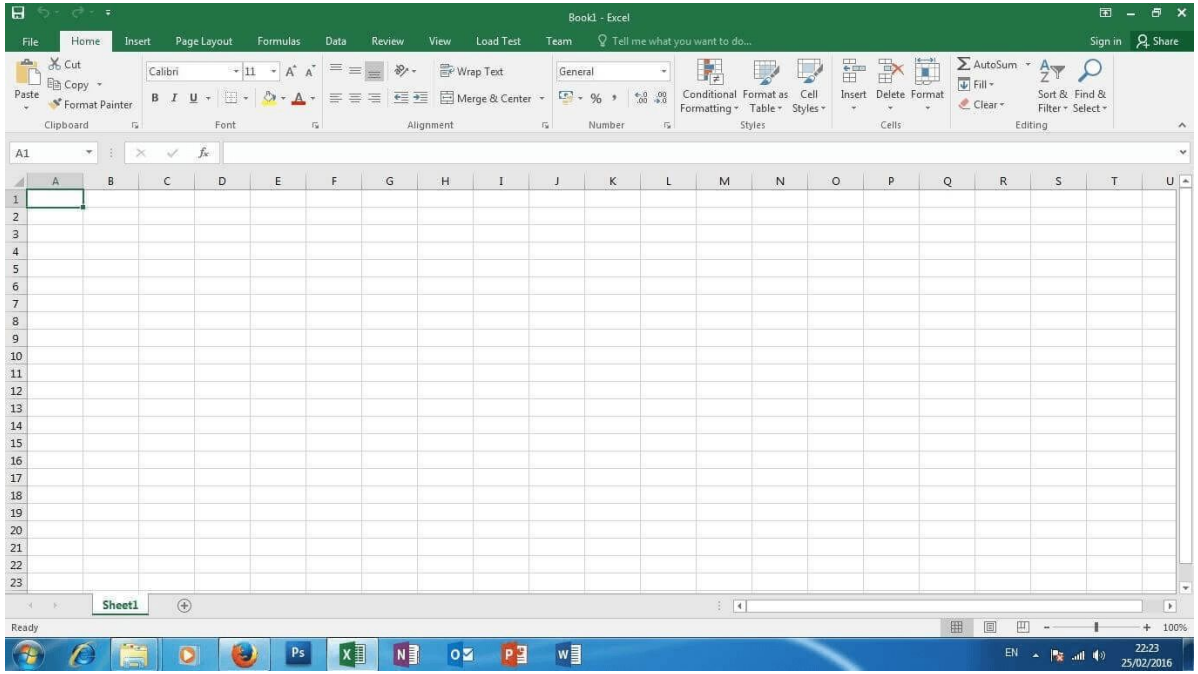
6. Установить возможность упрочнения молибдена некогерентными частицами карбида гафния за счет реализации косвенного механизма.

Материалы и методики исследования

Модификации железа



Программа Microsoft Excel



Оценка эффективности деформационного упрочнения феррита и аустенита

$$\Delta\tau_д = \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho_д},$$

где α - коэффициент, зависящий от типа решетки; b - вектор Бюргерса; G - модуль сдвига; ρ - плотность дислокаций.

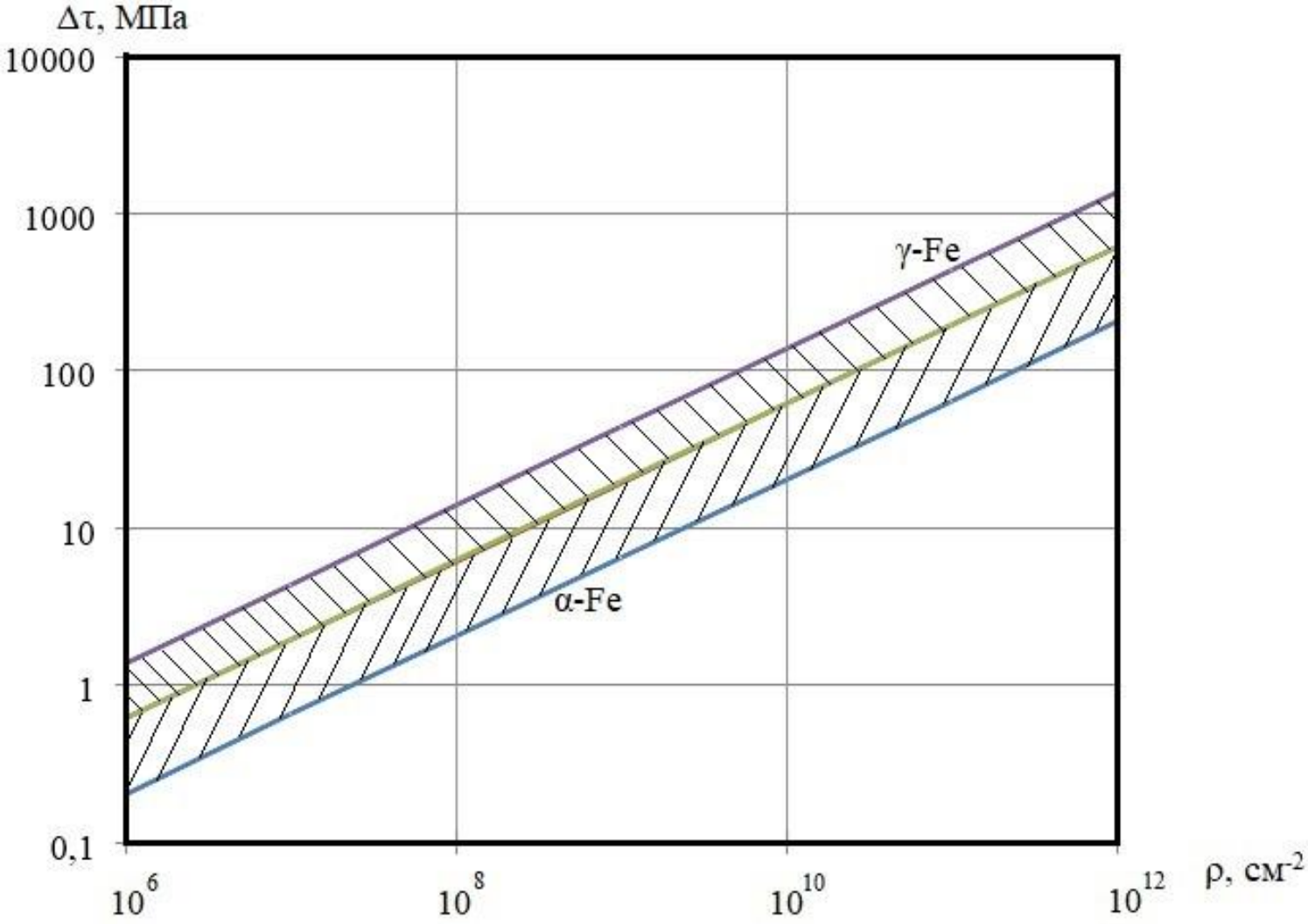
Результаты расчетов для α-железа.

$\rho_д$, см$^{-2}$	$\Delta\tau_1$, МПа	$\Delta\tau_2$, МПа
$1\cdot10^6$	0,2050	0,6150
$1\cdot10^7$	0,6483	1,9448
$1\cdot10^8$	2,0500	6,1500
$1\cdot10^9$	6,4827	19,4480
$1\cdot10^{10}$	20,5000	61,5000
$1\cdot10^{11}$	64,8267	194,4801
$1\cdot10^{12}$	205,0000	615,0000

Результаты расчетов для γ-железа.л

$\rho_д$, см$^{-2}$	$\Delta\tau_1$, МПа	$\Delta\tau_2$, МПа
$1\cdot10^6$	0,6224	1,3900
$1\cdot10^7$	1,9681	4,3955
$1\cdot10^8$	6,2238	13,8998
$1\cdot10^9$	19,6814	43,9551
$1\cdot10^{10}$	62,2380	138,9982
$1\cdot10^{11}$	196,8138	439,5509
$1\cdot10^{12}$	622,3800	1389,9820

Зависимость расчетных значений прироста предела текучести от плотности дислокаций для двух модификаций железа



Влияние легирующих элементов на твердорастворное упрочнение феррита

$$\Delta\sigma_{т.р} = k_i \cdot \chi \cdot C_i,$$

где k_i - коэффициент упрочнения феррита при легировании различными элементами;

χ - коэффициент перераспределения легирующих элементов в твердом растворе по отношению к общей концентрации;

C_i - концентрации элемента в твердом растворе.

Элемент	C+N	P	Si	Ti	Al	Cu	Mn	Cr	Ni	Mo	V
k_i, МПа	4670	690	86	82	60	39	33	31	30	11	3

Элемент	Cr	Mo	V	Ti	Mn	Ni	Si
χ_i	0,75	0,6...0,7	0,5...0,8	0,0001	0,6...0,7	1	1

$\Delta\sigma_{Cr} = 31 \cdot 0{,}75 = 23{,}25$ МПа;

$\Delta\sigma_{Mo} = 11 \cdot 0{,}65 = 7{,}15$ МПа;

$\Delta\sigma_{V} = 3 \cdot 0{,}65 = 1{,}95$ МПа;

$\Delta\sigma_{Ti} = 82 \cdot 0{,}0001 = 0{,}0082$ МПа;

$\Delta\sigma_{Mn} = 33 \cdot 0{,}65 = 21{,}45$ МПа;

$\Delta\sigma_{Ni} = 30 \cdot 1 = 30$ МПа;

$\Delta\sigma_{Si} = 86 \cdot 1 = 86$ МПа.

$$Ti \rightarrow V \rightarrow Mo \rightarrow Mn \rightarrow Cr \rightarrow Ni \rightarrow Si$$

Оценка эффективности упрочнения границами зерен, субзерен и ячеек феррита

эффективность зернограничного упрочнения

$\Delta\sigma_т^з = 0{,}63 \cdot d^{-1/2}$ (d - размер зерна);

эффективность упрочнения границами субзерен

$\Delta\sigma_т^с = 0{,}063 \cdot d^{-1/2}$ (d - размер субзерна);

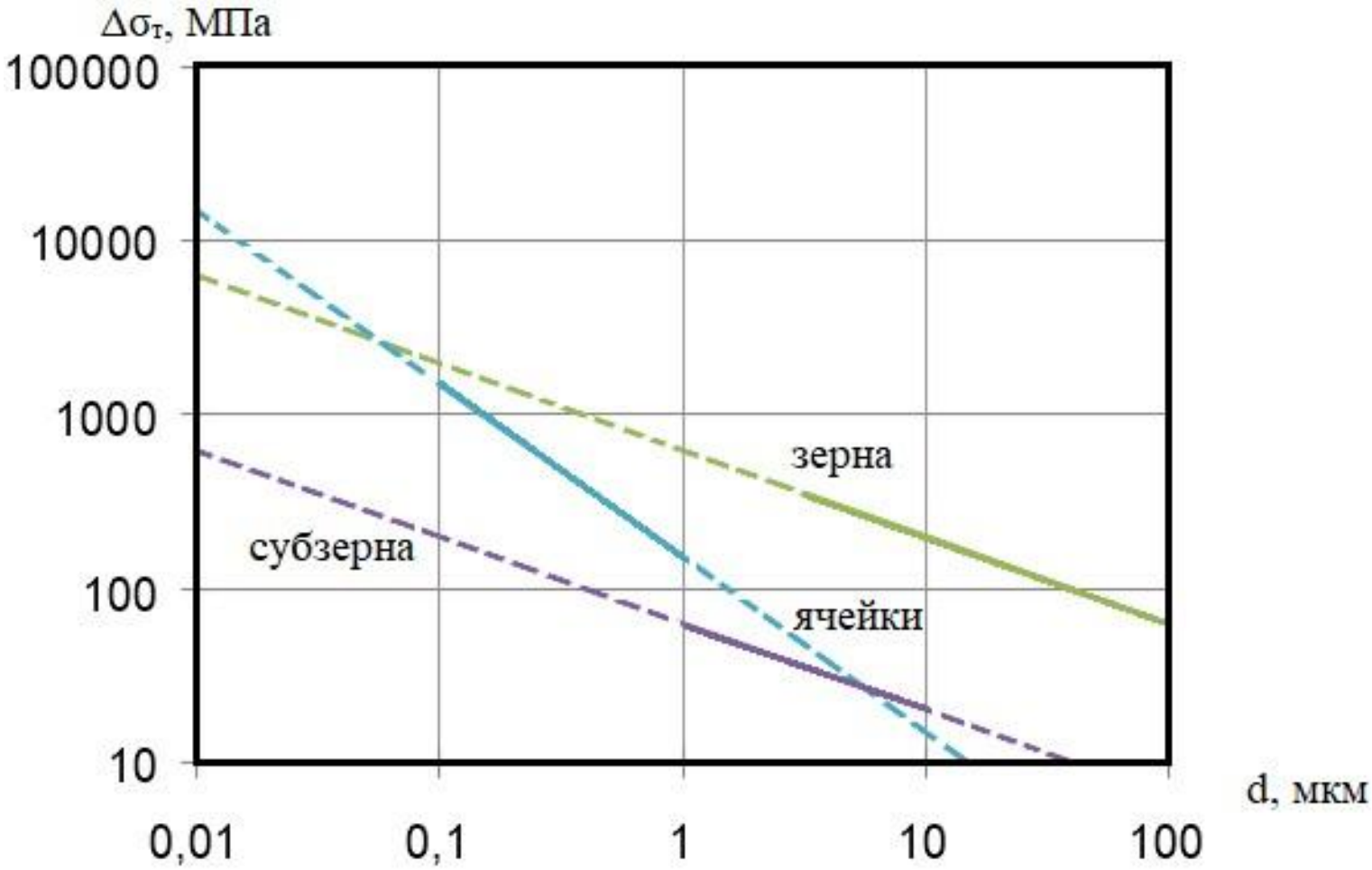
эффективность упрочнения за счет образования ячеистой структуры

$\Delta\sigma_т^я = 1{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot d^{-1}$ (d - размер ячейки).

Результаты расчетов эффективности упрочнения

d, мкм	$\Delta\sigma_т^з$, МПа	$\Delta\sigma_т^с$, МПа	$\Delta\sigma_т^я$, МПа
0,01	6300	630	15000
0,1	1992	199	1500
1	630	63	150
10	199	20	15
100	63	6	1,5

Зависимости прироста предела текучести при упрочнении границами зерен, субзерен или ячеек от их размера



Размер зерна 5-100 мкм,

размер ячейки 0,1-1 мкм,

размер субзерна 1-10 мкм.

Упрочнение железа нитридами по механизму Мотта-Набарро

$$\Delta\tau_{д.ч.} = 2\cdot\varepsilon\cdot f\cdot G_M,$$

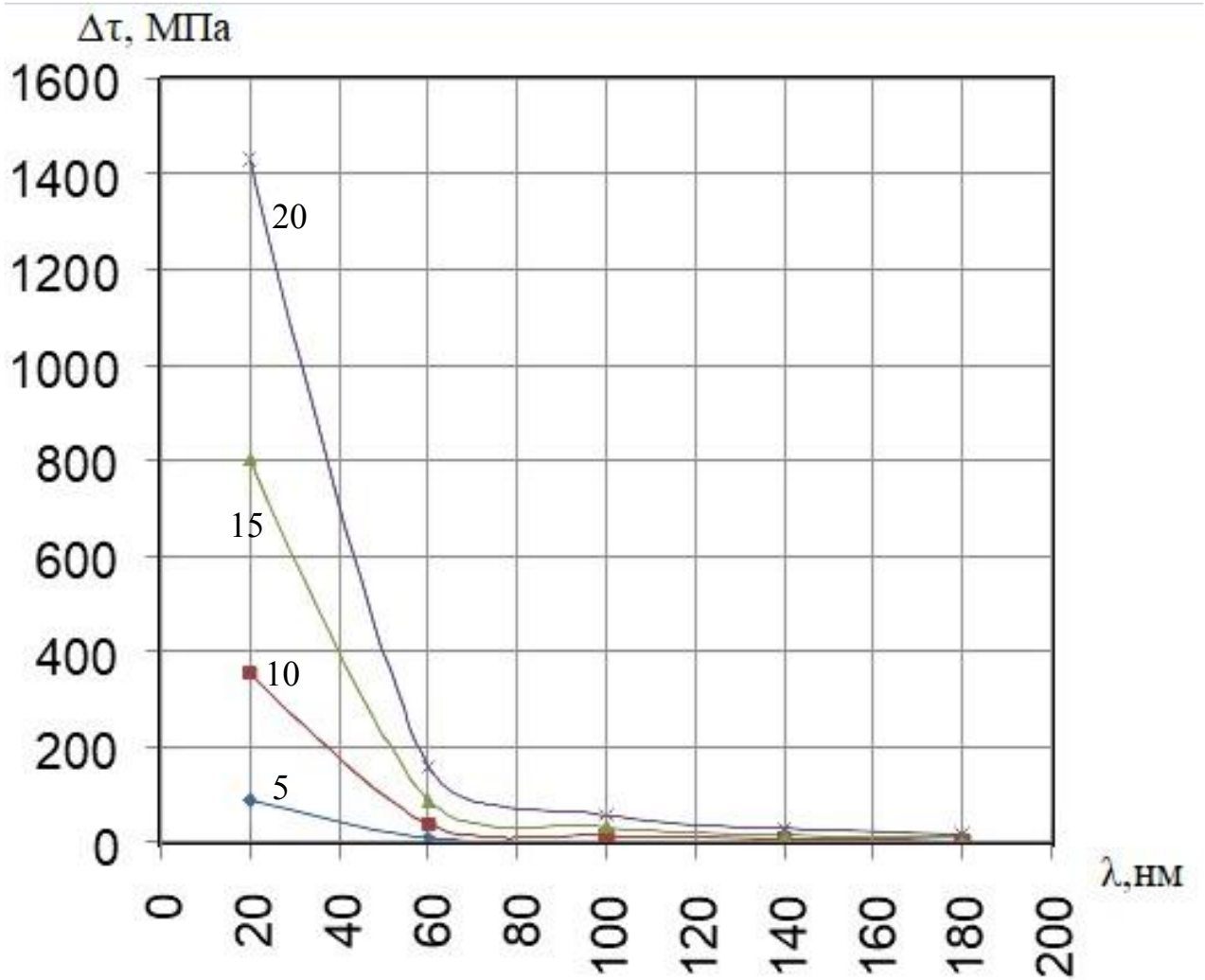
где ε - общий параметр несоответствия; f - объемная доля частиц в матрице; G_M - модуль сдвига матрицы.

Характеристики нитридов и железа

Материал	G, МПа	E, МПа	K, МПа	a, мм	v	b, мм
α-Fe	82000			$2{,}87\cdot10^{-7}$	0,3	$2{,}5\cdot10^{-7}$
TiN	160000	440000	292000	$4{,}235\cdot10^{-7}$		
ZrN	161300	400000	267000	$4{,}59\cdot10^{-7}$		
VN	192000	460000	320000	$4{,}13\cdot10^{-7}$		
NbN	130000	400000	285000	$4{,}5\cdot10^{-7}$		
HfN	195000	500000	380000	$4{,}53\cdot10^{-7}$		
TaN	231400	578500	385700	$4{,}0\cdot10^{-7}$		

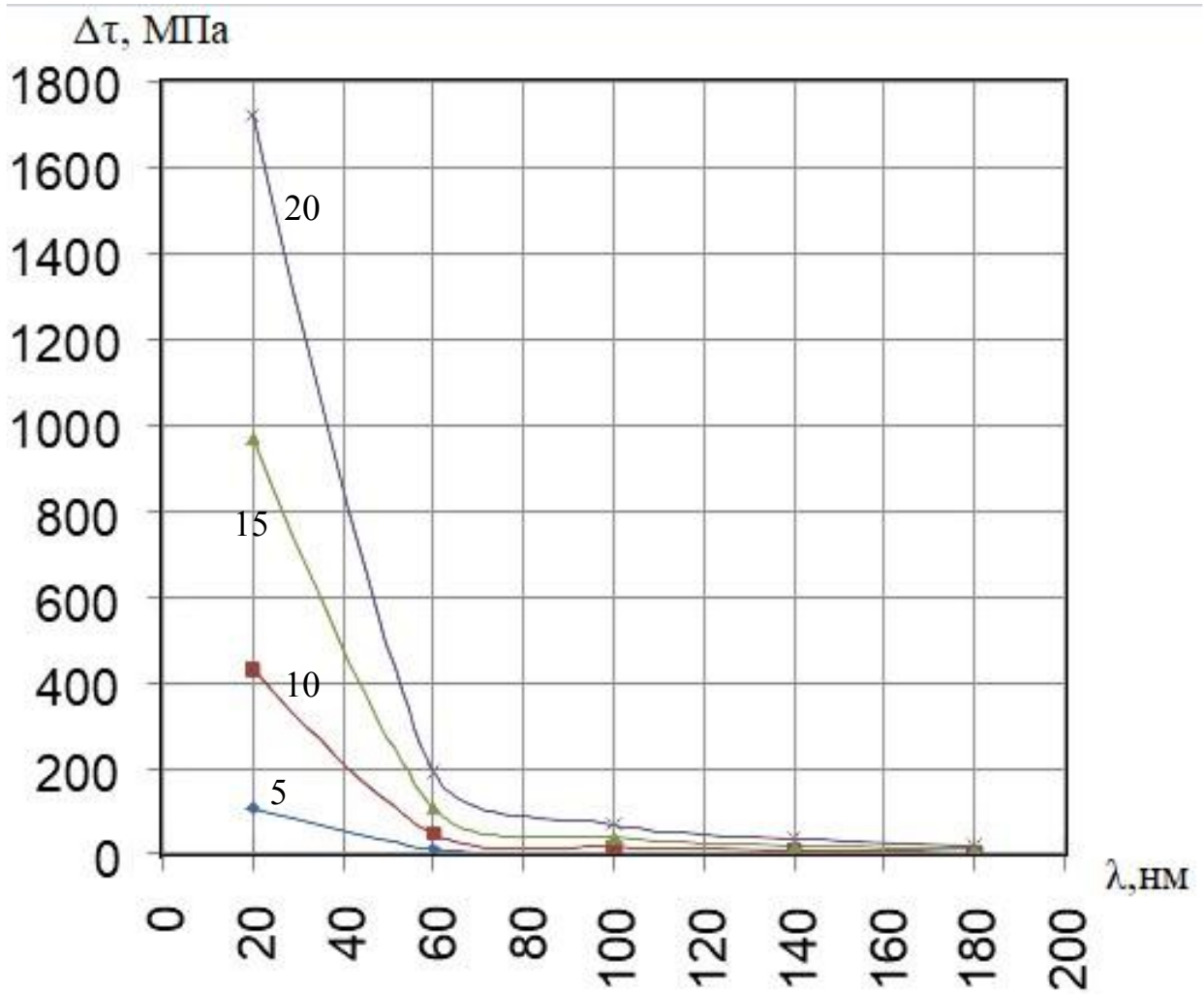
Упрочнение железа частицами TiN

d,нм / λ,нм	5	10	15	20
20	89,38	357,53	804,44	1430,12
60	9,93	39,73	89,38	158,90
100	3,58	14,30	32,18	57,20
140	1,82	7,30	16,42	29,19
180	1,10	4,41	9,93	17,66



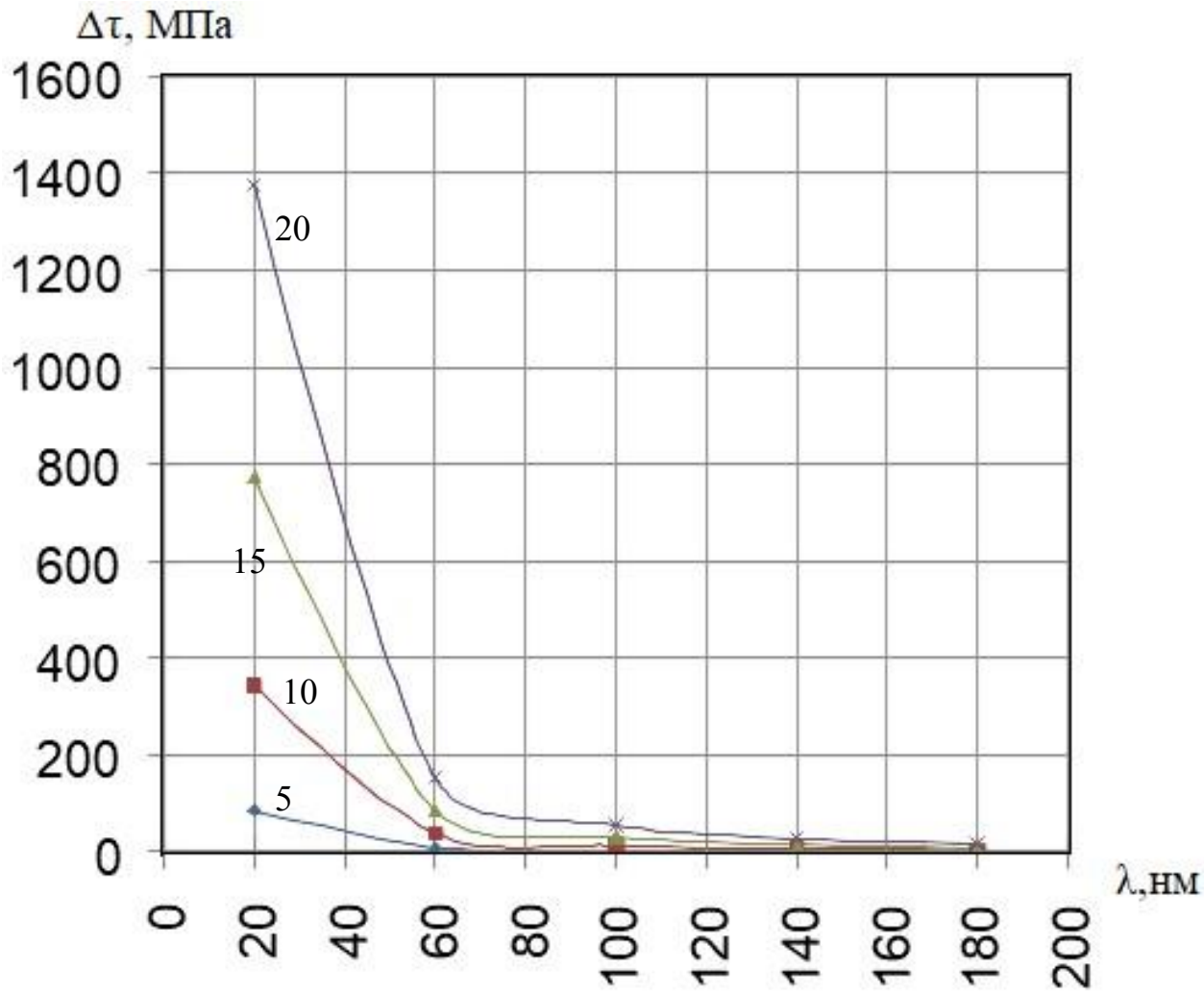
Упрочнение железа частицами ZrN

d,нм λ,нм	5	10	15	20
20	107,62	430,49	968,60	1721,95
60	11,96	47,83	107,62	191,33
100	4,30	17,22	38,74	68,88
140	2,20	8,79	19,77	35,14
180	1,33	5,31	11,96	21,26



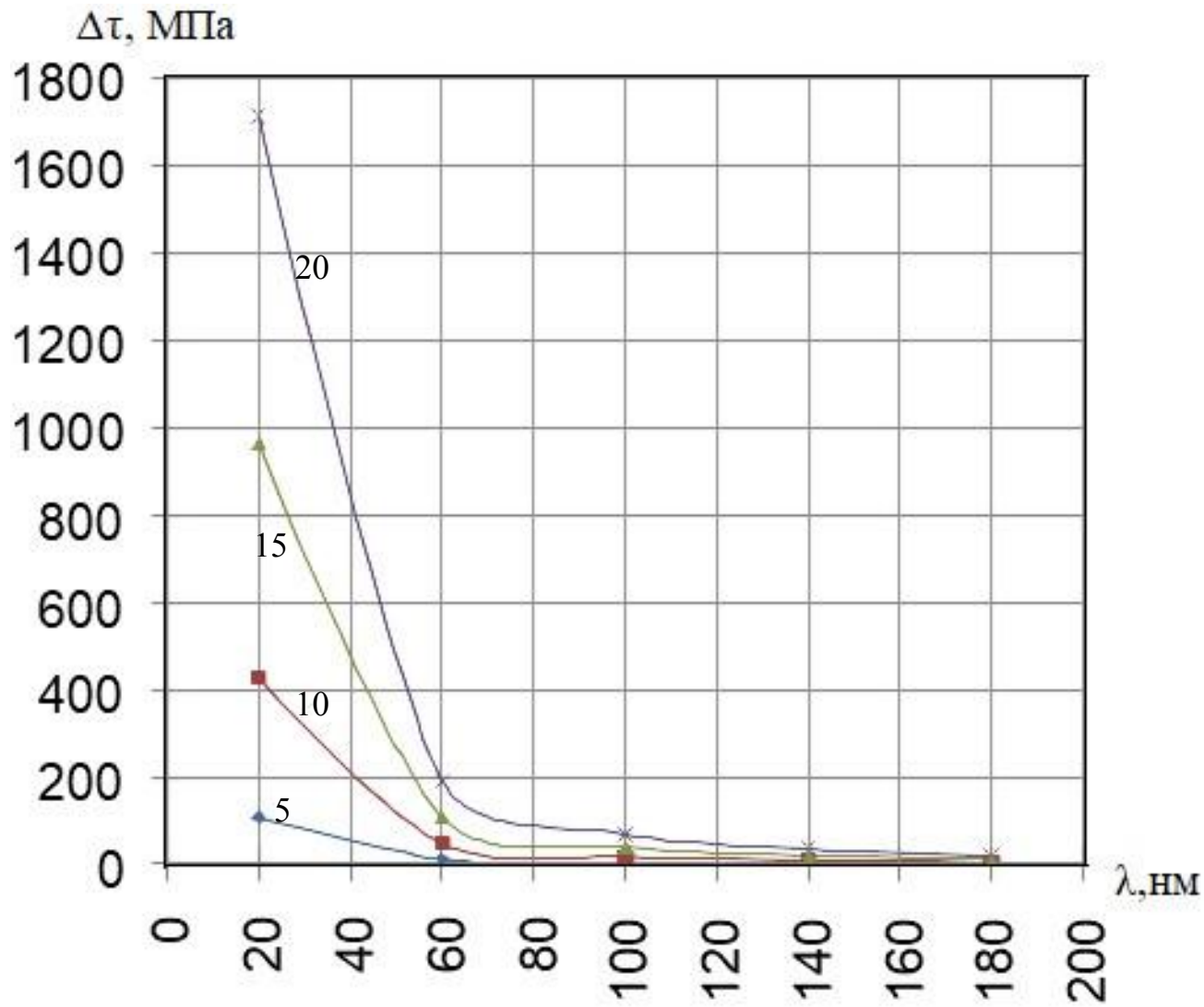
Упрочнение железа частицами VN

d,нм λ,нм	5	10	15	20
20	85,99	343,94	773,87	1375,77
60	9,55	38,22	85,99	152,86
100	3,44	13,76	30,95	55,03
140	1,75	7,02	15,79	28,08
180	1,06	4,25	9,55	16,98



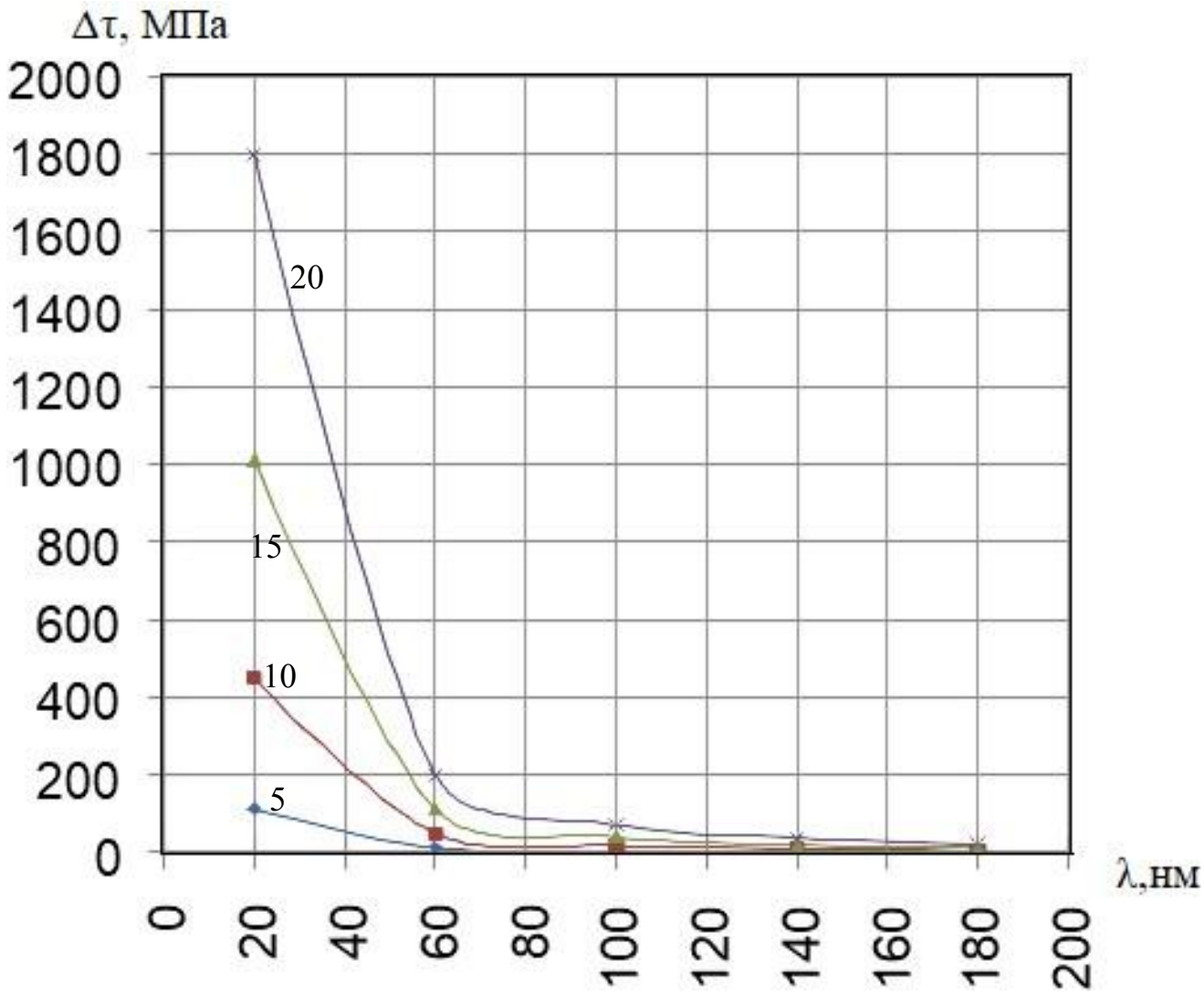
Упрочнение железа частицами NbN

d,нм λ,нм	5	10	15	20
20	107,06	428,22	963,50	1712,89
60	11,90	47,58	107,06	190,32
100	4,28	17,13	38,54	68,52
140	2,18	8,74	19,66	34,96
180	1,32	5,29	11,90	21,15



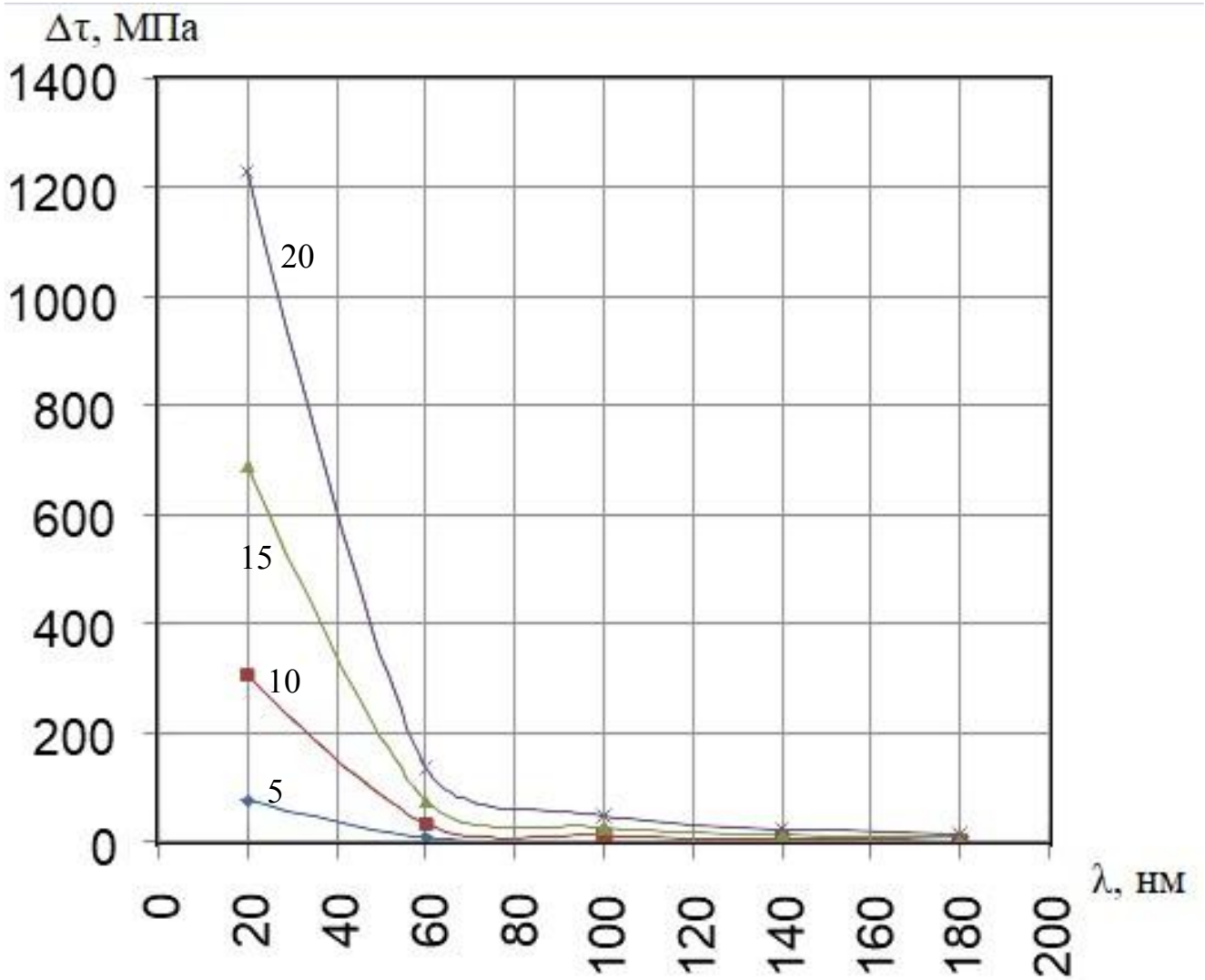
Упрочнение железа частицами HfN

d,нм λ,нм	5	10	15	20
20	112,44	449,76	1011,97	1799,05
60	12,49	49,97	112,44	199,89
100	4,50	17,99	40,48	71,96
140	2,29	9,18	20,65	36,72
180	1,39	5,55	12,49	22,21

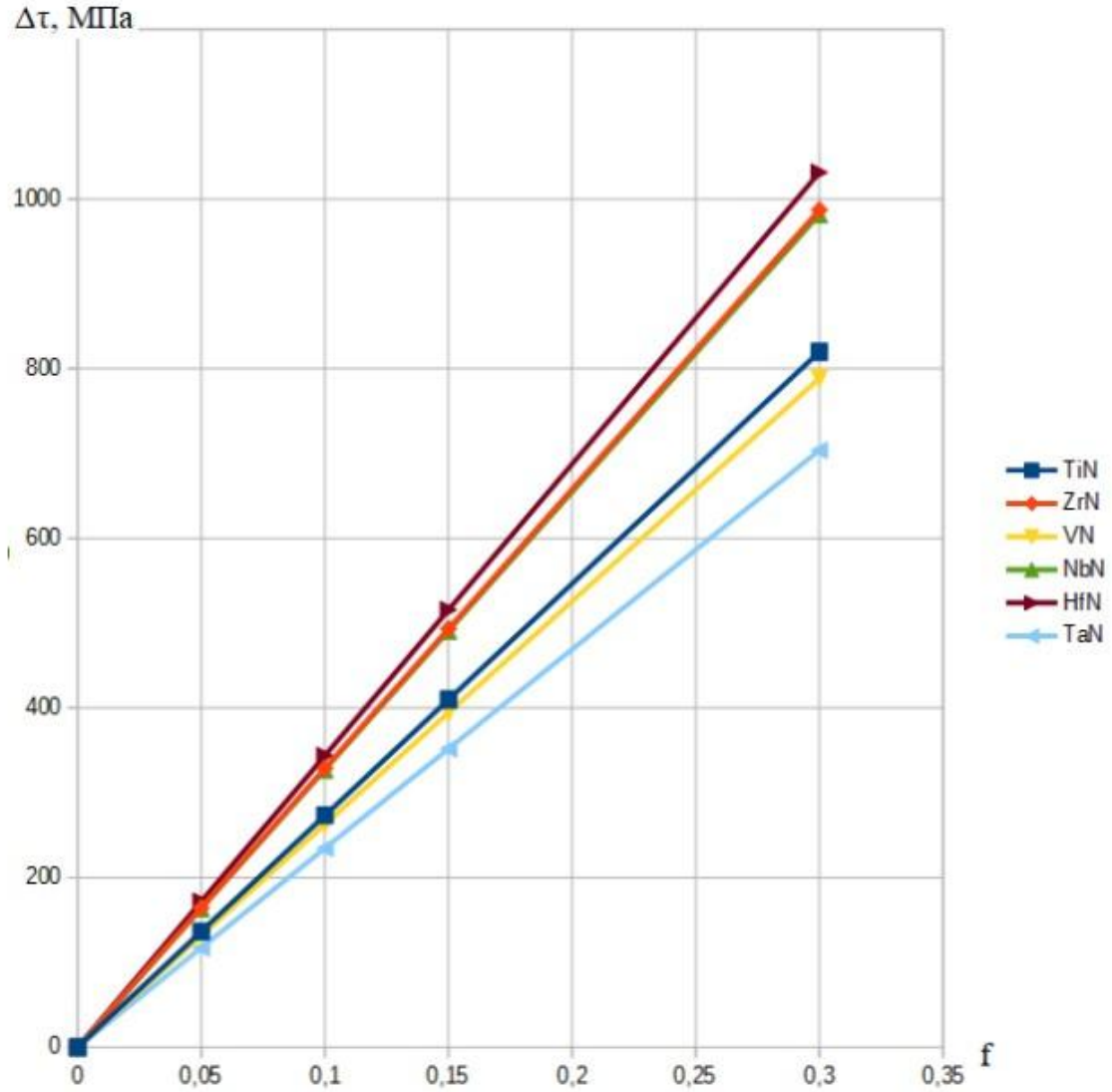


Упрочнение железа частицами TaN

d,нм λ,нм	5	10	15	20
20	76,73	306,91	690,54	1227,63
60	8,53	34,10	76,73	136,40
100	3,07	12,28	27,62	49,11
140	1,57	6,26	14,09	25,05
180	0,95	3,79	8,53	15,16



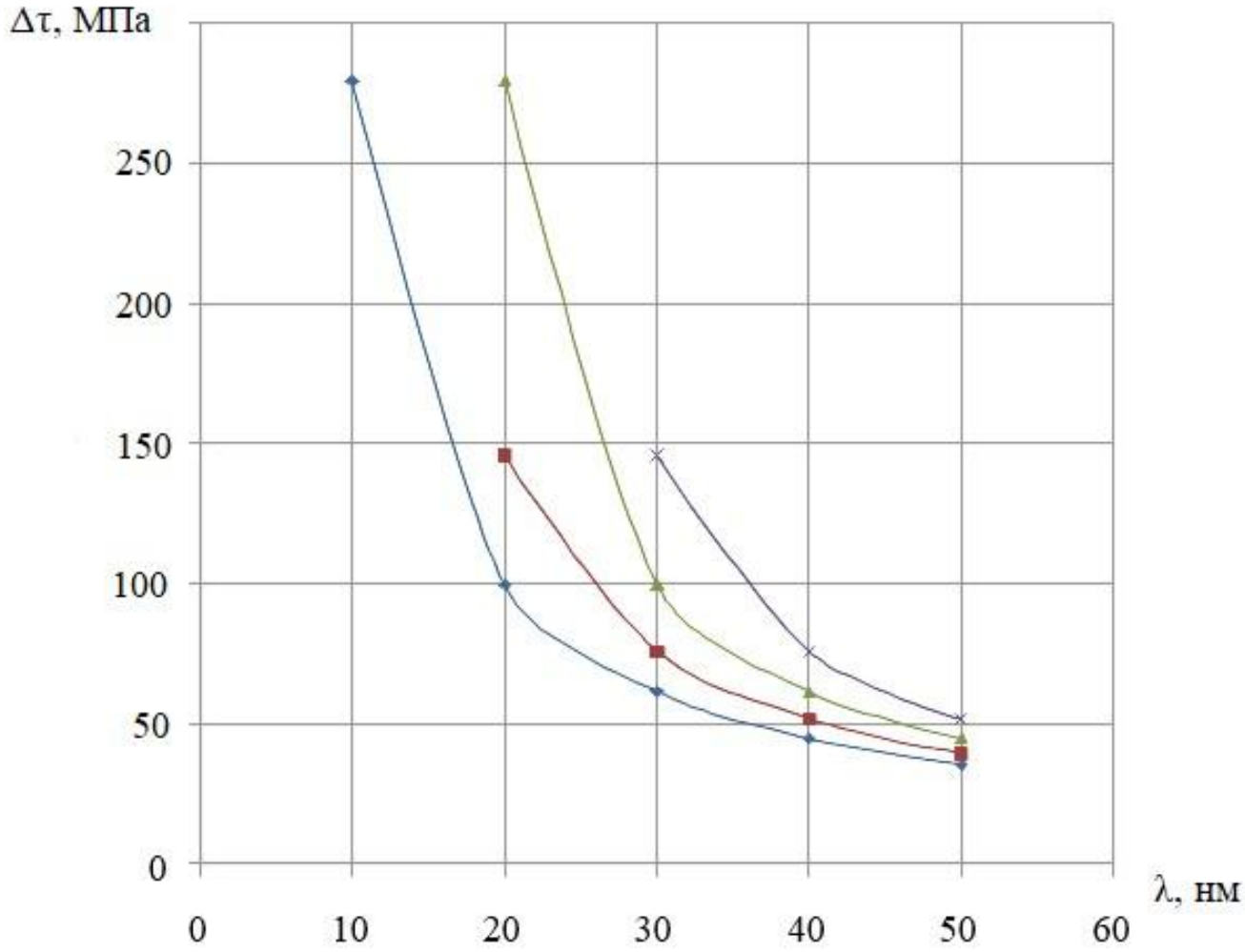
Зависимость величины предельного упрочнения железа по механизму Мотта-Набарро от объемной доли нитридов в матрице



Упрочнение железа нитридами по Оровану

$$\Delta\tau = 0{,}85\frac{Gb}{2\pi(\lambda - 2r)}\Phi ln\left(\frac{\lambda - 2r}{2b}\right)$$

где Ф - коэффициент, характеризующий тип взаимодействия с частицами дислокаций; G - модуль упругости матрицы; b - вектор Бюргерса матрицы; λ, r - соответственно расстояние между центрами и радиус частиц.



Выводы

1. Проанализирована физическая природа основных механизмов упрочнения сплавов и определены математические модели, используемые для количественных оценок прироста прочности.

2. С увеличением плотности дислокаций от 10^6 до 10^{12} см$^{-2}$ прирост напряжения течения для α-железа повышается от 0,2 до 615 МПа, для γ-железа - от 0,6 до 1390 МПа. Показано, что при плотности дислокаций в ферритной матрице меньше 10^9 см$^{-2}$ упрочняющий эффект незначителен, прирост предела текучести $\Delta\tau_д$<20...40 МПа и сопоставим с напряжением Пайерлса-Набарро, т. е. компонентной дислокационного упрочнения можно пренебречь. Для аустенитных сталей вклад дислокационного упрочнения можно не учитывать при меньшей плотности дислокаций $\rho_д<10^8$ см$^{-2}$ ($\Delta\tau_д$<30...50 МПа).

3. Проведена оценка эффекта твердорастворного упрочнения феррита элементами замещения с учетом карбидообразующей способности некоторых элементов при условии их разного содержания. В порядке увеличения эффективности упрочнения феррита элементы замещения можно расположить в ряд Ti→V→Mo→Mn→Cr→Ni→Si.

4. Рассчитана эффективность зернограничного упрочнения, упрочнения границами субзерен, упрочнения за счет образования ячеистой структуры в феррите. Показано, что уровень упрочнения границами субзерен меньше уровня зернограничного упрочнения. Упрочнение при образовании ячеистой структуры наиболее эффективно при малых размерах ячеек: при ширине ячейки менее 0,1 мкм этот механизм становится преобладающим. Упрочнение при образовании ячеек размером 0,1...0,7 мкм более эффективно, чем упрочнение границами зерен размером более 5...7 мкм.

5. Рассчитана эффективность дисперсионного упрочнения железа нитридами разных металлов. Диаметр нитридов изменяли в дипазоне 5-25 нм, расстояние между частицами составляло 20-180 нм. При одинаковой объемной доли нитридов, когерентно связанных с матрицей, эффективность упрочнения железа увеличивается в следующем ряду: TaN, VN, TiN, NbN, ZrN, HfN. При введении в железо некогерентных нитридов упрочнение феррита зависит только от геометрии дисперсных частиц, их объемной доли, а также расстояния между ними, и существенно ниже эффекта от когерентных частиц.

6. Показано, что при введении в молибден на стадии получения полуфабриката методом порошковой металлургии частиц карбида гафния диаметром ~9 мкм упрочнение сплава происходит по зернограничному механизму (косвенное влияние дисперсных частиц).