

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Е. Курепин, В.А. Мартынов, Н.В. Мошкина

АО «Государственный институт машиностроения им. В.В. Бахирева»
Нижегородская область, Дзержинск, Россия

В работе представлены результаты численного моделирования процессов ударно-волнового нагружения алмазных порошков и композиций, содержащих медные и алмазные порошки. Расчетным путем с использованием пользовательской подпрограммы [1] в программной среде ANSYS/Autodyn определены термодинамические параметры компонентов смесей (давление и температура) за фронтом ударной волны. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [2].

Численное моделирование процесса распространения ударных волн (УВ) в смеси порошков проводилось в двумерной плоской постановке с использованием эйлерова решателя ANSYS/Autodyn. Построение среды проводилось аналогично моделированию пористых композитных материалов по алгоритму, описанному в работе [1].

Использовалась система единиц мкм-мкс-пг. Рабочая область задачи представляла собой прямоугольник с размерами 100 мкм×500 мкм с сеточным разбиением 0,25 мкм (рисунок 1).

Для численного моделирования процессов генерации и распространения стационарных ударных волн (УВ) рабочая область заполнялась частицами со свойствами компонентов (при заполнении рабочей области принималось, что размеры крупинок алмазного порошка порядка 1 мкм) с начальной скоростью численно равной заданной массовой скорости УВ (использовались экспериментальные результаты, приведенные в работе [2]). В процессе отражения от жесткой стенки подвижной среды в ней генерировалась ударная волна, направление распространения которой противоположно направлению первоначального движения среды. Рассчитанные параметры гидродинамического поля считывались с датчиков, расположенных в окрестности отражающей стенки, передавались и статистически обрабатывались в MS Excel. На основе осредненных результатов строилась ударная адиабата в D-и координатах. Одновременно определялась средняя по датчикам температура и строились графики степени нагрева среды от давления в УВ.

Моделирование генерации и распространения УВ проводилось в следующих порошках:

- Алмазные порошки с плотностями 0,61 г/см³ (объемное содержание пор ~ 82,6%); 1,79 г/см³ (пористость ~ 49%); 1,9 г/см³ (пористость ~ 45,9%); 2,02 г/см³ (пористость ~ 42,5%)
- Порошки меди и алмаза с объемной концентрацией 75% и 25%, соответственно. Плотности смесей – 6,30 г/см³ (пористость ~ 16,8%); 4,63 г/см³ (пористость ~ 38,9%).
- Порошки меди и алмаза с объемной концентрацией 50% и 50%. Плотности смесей – 5,11 г/см³ (пористость ~ 17,8%); 3,76 г/см³ (пористость ~ 39,5%).

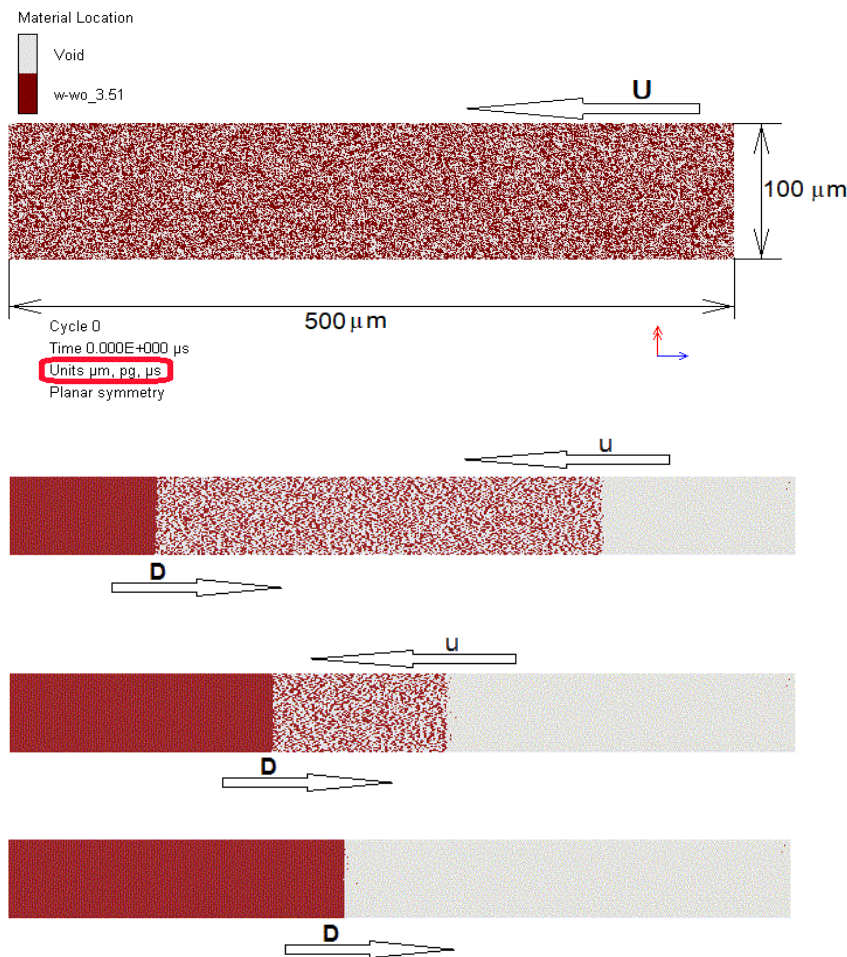


Рисунок 1. Рабочая область задачи и раскадровка процесса генерации УВ

Для численного моделирования процесса распространения УВ для компонентов использовались уравнения состояния (УрС) в форме МИ-Грюнайзена-Гюгонио.

$$P = \frac{\rho_0 a^2 \mu [1 + \mu]}{[1 - (S_1 - 1)\mu]^2} + \gamma_0 \rho e$$

где P – давление, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ_0 – начальная плотность, ρ – текущая плотность, γ_0 – коэффициент Грюнайзена, e – удельная внутренняя энергия, a и S_1 – коэффициенты ударной адиабаты.

Параметры УрС приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Компоне нт	Плотность, г/см ³	a, км/с	S1	γ ₀	C(298 K), Дж/кг/К
Алмаз	3,51	12,16	1	0,97	509
Медь	8,93	3,94	1,489	1,99	385

Параметры ударной адиабаты алмаза взяты из монографии [2], нулевой коэффициент Грюнайзена – из работы [3], теплоемкость из справочника [4]. Параметры УрС меди – из стандартной библиотеки материалов ANSYS/Autodyn.

Расчет скорости ударной волны проводился по следующему алгоритму:

- Выделялась часть области, содержащая ударно сжатый материал, и определялась его плотность – ρ .
- Из закона сохранения массы в форме $\rho = \rho_0 \cdot D / (D - u)$ рассчитывалась скорость УВ – D при заданной массовой скорости u .
- Давление P в УВ определялось по зависимости $P = \rho_0 \cdot u \cdot D$.

Температура за фронтом УВ рассчитывалась как средняя по величинам, зарегистрированным в датчиках (количество датчиков – 121) и осредненным по времени. При этом рассчитывалось среднее квадратичное отклонение (СКО). Результаты представлены в таблицах 2 – 4. Достаточно большой СКО при расчете температуры смеси порошков связано с тем, что, во-первых, у меди и алмаза коэффициенты всестороннего сжатия существенно различаются, следовательно, отличаются температуры компонентов, во-вторых, в эйлеровом решателе ANSYS/Autodyn отсутствует процедура моделирования процессов теплопроводности.

Результаты расчетов представлены в графическом виде на рисунках 2–4. С использованием MS Excel получены параметры линий тренда как для ударных адиабат в $D-u$ форме, так и для зависимостей оценок температуры за фронтом от давления в УВ.

Таблица 2. Результаты расчетов параметров за фронтом ударной волны в алмазных порошках

Средняя пористость	Массовая скорость, км/с	Скорость УВ (Драсч), км/с	1-Драсч /Дэкс	Давление на фронте УВ, ГПа	Степень нагрева среды за фронтом УВ, К	Относительная погрешность расчета температуры
42,5%	1,91	4,39	0,044	16,92	296	0,04
42,5%	2,61	5,87	-0,029	30,92	523	0,05
42,5%	3,28	7,23	-0,029	47,91	830	0,03
42,5%	3,92	8,49	-0,053	67,18	976	0,11
45,9%	2,01	4,30	0,048	16,44	426	0,09
45,9%	3,36	7,00	-0,001	44,67	785	0,05
45,9%	4,0	8,18	-0,029	62,16	948	0,05
45,9%	4,44	9,02	-0,020	76,11	1219	0,04
45,9%	6,66	12,76	-0,043	161,55	2235	0,05

Продолжение таблицы 2

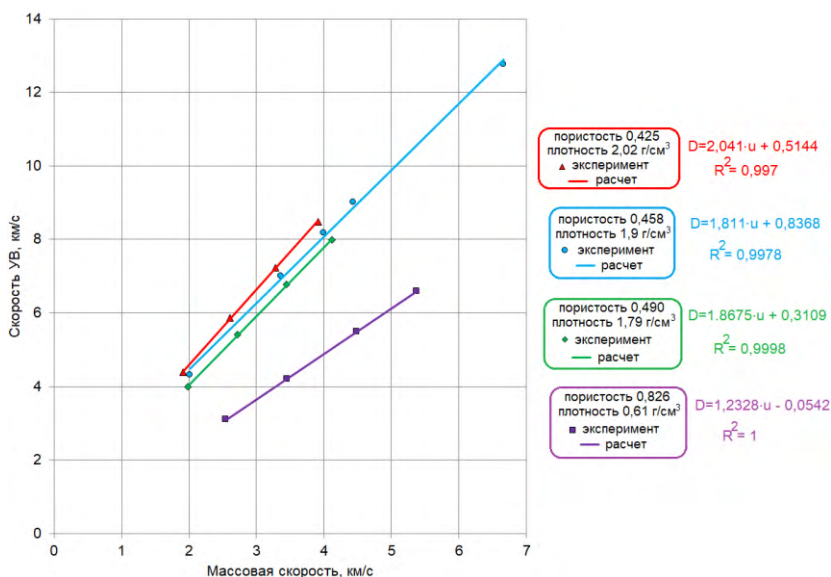
Средняя пористость	Массовая скорость, км/с	Скорость УВ (Драсч), км/с	1-Драсч /Dэксп	Давление на фронте УВ, ГПа	Степень нагрева среды за фронтом УВ, К	Относительная погрешность расчета температуры
49,0%	1,98	3,99	0,126	14,12	625	0,08
49,0%	2,72	5,41	0,0419	26,35	937	0,12
49,0%	3,45	6,78	0,002	41,84	1175	0,07
49,0%	4,12	7,98	-0,012	58,84	1445	0,06
82,6%	2,55	3,09	0,140	4,81	401	0,14
82,6%	3,46	4,21	0,096	8,87	505	0,12
82,6%	4,49	5,48	0,063	15,00	644	0,09
82,6%	5,38	6,58	0,054	21,59	981	0,02

Таблица 3. Результаты расчетов параметров за фронтом ударной волны смесей медного и алмазного порошков с объемной концентрацией 75% и 25%, соответственно

Средняя пористость	Массовая скорость, км/с	Скорость УВ (Драсч), км/с	1-Драсч/Dэксп	Давление на фронте УВ, ГПа	Степень нагрева среды за фронтом УВ, К	Относительная погрешность расчета температуры
16,8%	0,8	3,72	-0,016	18,98	221	0,16
16,8%	1	4,053	0,007	25,41	282	0,19
16,8%	1,66	5,37	0,040	55,40	560	0,18
16,8%	2,09	6,57	0,003	87,77	805	0,10
16,8%	2,51	7,24	0,034	115,61	1025	0,11
16,8%	2,81	7,5	0,077	131,42	11834	0,13
25,6%	1,02	2,73	0,026	13,43	283	0,067
25,6%	1,29	3,09	-0,007	18,22	725	0,083
25,6%	2,08	4,71	-0,004	44,76	1120	0,110
25,6%	2,61	5,64	0,033	66,66	1444	0,077
25,6%	3,06	6,64	0,017	94,45	1789	0,065

Таблица 4. Результаты расчетов параметров за фронтом ударной волны смесей медного и алмазного порошков с объемной концентрацией 50% и 50%, соответственно

Средняя пористость	Массовая скорость, км/с	Скорость УВ (Драсч), км/с	1-Драсч/Дэ ксп	Давление на фронте УВ, ГПа	Степень нагрева среды за фронтом УВ, К	Относительная погрешность расчета температуры
17,7%	0,87	4,04	-0,077	18,09	243	0,12
17,7%	1,1	4,43	-0,067	24,54	311	0,13
17,7%	1,77	6,40	-0,078	58,61	603	0,11
17,7%	2,24	7,49	-0,062	87,41	701	0,09
17,7%	2,73	7,83	0,015	107,74	923	0,10
17,7%	3,06	8,51	0,037	132,32	1271	0,05
39,5%	1,13	6,28	-0,016	11,74	157	0,13
39,5%	2,17	6,64	-0,029	43,14	477	0,06
39,5%	2,73	6,85	0,022	63,26	814	0,07
39,5%	3,60	7,42	0,078	98,31	1201	0,09


Рисунок 2. Ударные адиабаты алмазного порошка

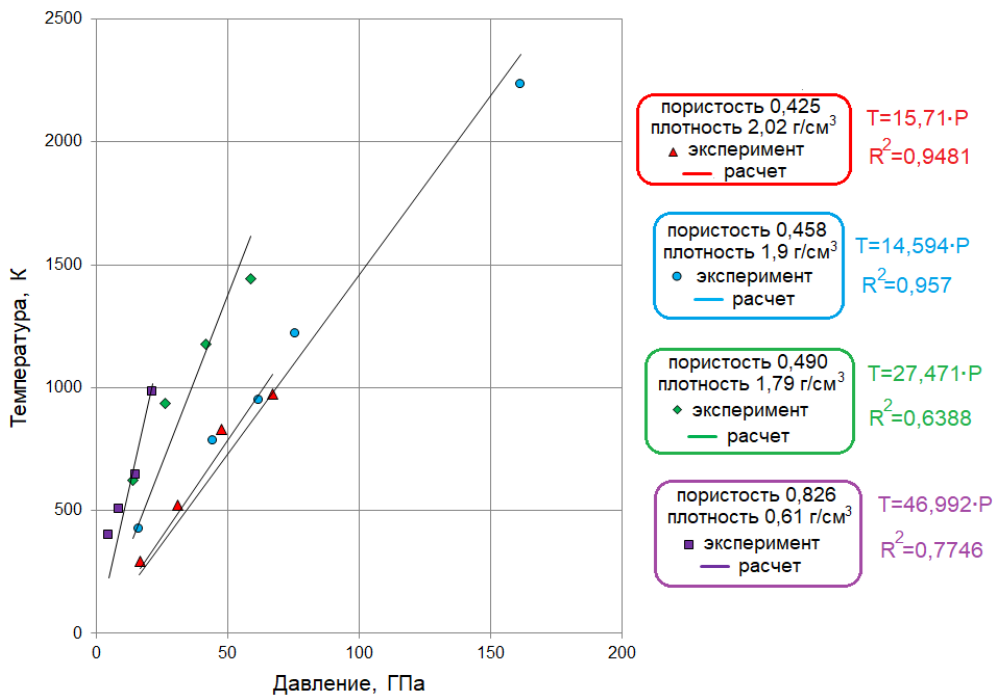


Рисунок 3. Зависимости нагрева от давления для алмазного порошка

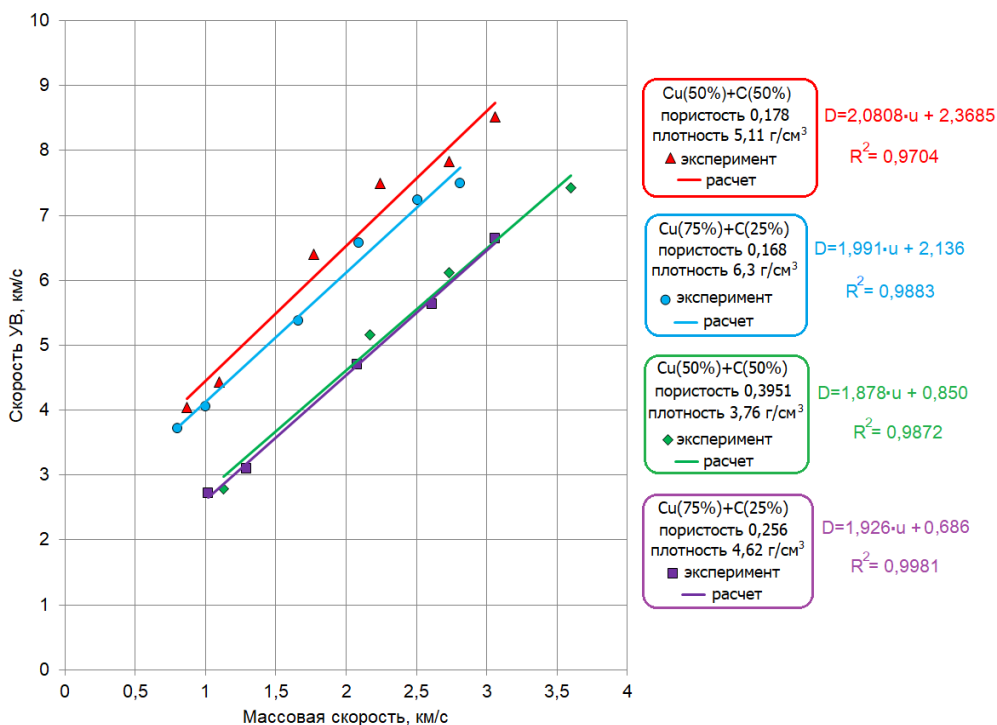


Рисунок 4. Ударные адиабаты для смеси порошков меди и алмаза

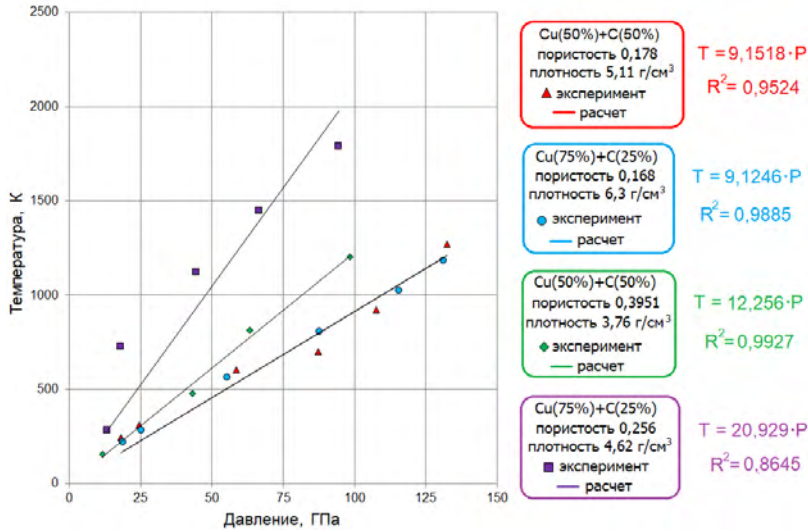


Рисунок 5. Зависимости нагрева от давления для смеси порошков меди и алмаза

В результате проведенных расчетов получены следующие результаты:

- Для алмазных порошков со средней плотностью 2,02 г/см³ ударная адиабата $D(\text{км/с}) = 0,5144 + 2,041 \cdot u(\text{км/с})$, нагревание уплотненного порошка $\Delta T(\text{К}) = 15,71 \cdot P(\text{ГПа})$;
- Для алмазных порошков со средней плотностью 1,9 г/см³ ударная адиабата $D(\text{км/с}) = 0,8368 + 1,811 \cdot u(\text{км/с})$, нагревание уплотненного порошка $\Delta T(\text{К}) = 14,6 \cdot P(\text{ГПа})$;
- Для алмазных порошков со средней плотностью 1,79 г/см³ ударная адиабата $D(\text{км/с}) = 0,3109 + 1,8675 \cdot u(\text{км/с})$, нагревание уплотненного порошка $\Delta T(\text{К}) = 27,5 \cdot P(\text{ГПа})$;
- Для алмазных порошков со средней плотностью 0,826 г/см³ ударная адиабата $D(\text{км/с}) = 0,0542 + 1,2328 \cdot u(\text{км/с})$, нагревание уплотненного порошка $\Delta T(\text{К}) = 47,0 \cdot P(\text{ГПа})$.
- Для смесей порошков меди и алмаза с объемным содержанием 75% и 25%, соответственно, и средней плотностью 6,3 г/см³ ударная адиабата $D(\text{км/с}) = 2,136 + 1,991 \cdot u(\text{км/с})$, нагревание уплотненного порошка $\Delta T(\text{К}) = 9,12 \cdot P(\text{ГПа})$;
- Для смесей порошков меди и алмаза с объемным содержанием 75% и 25%, соответственно, и средней плотностью 4,62 г/см³ ударная адиабата $D(\text{км/с}) = 0,686 + 1,926 \cdot u(\text{км/с})$, нагревание уплотненного порошка $\Delta T(\text{К}) = 20,9 \cdot P(\text{ГПа})$;
- Для смесей порошков меди и алмаза с объемным содержанием 50% и 50%, соответственно, и средней плотностью 5,11 г/см³ ударная адиабата $D(\text{км/с}) = 2,3685 + 2,0808 \cdot u(\text{км/с})$, нагревание уплотненного порошка $\Delta T(\text{К}) = 9,15 \cdot P(\text{ГПа})$;
- Для смесей порошков меди и алмаза с объемным содержанием 50% и 50%, соответственно, и средней плотностью 3,76 г/см³ ударная адиабата $D(\text{км/с}) = 0,850 + 1,878 \cdot u(\text{км/с})$, нагревание уплотненного порошка $\Delta T(\text{К}) = 12,3 \cdot P(\text{ГПа})$.

Список литературы

1. А.Ю. Константинов, В.А. Мартынов, Н.В. Мошкина «Применение численных методов для оценки термомеханических свойств дисперсных композитных материалов». «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Международная конференция XV Харитоновские тематические научные чтения, сборник докладов. Саров 2013г.
2. «Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ». Р.Ф. Трунин, Л.Ф. Гундаренко, М.В. Жерноклетов, Г.В. Симаков, ВНИИЭФ РФ ЯЦ, Саров 2006.
3. М.Н. Магомедов «Изменение теплофизических свойств алмаза при изотермическом сжатии». Журнал технической физики, 2017, том 87, вып.5.
4. «Физические величины: справочник»/ Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова – М.; Энергоатомиздат, 1991г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЖОНСОНА-КУКА ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОБИВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ПРЕГРАД

А.В.Городничес^{1,2}, А.Г.Иоилес^{1,2}, О.Н.Пронина¹, С.С.Соколов¹, А.Л.Стадник¹, Т.И.Чайка¹

¹ Российский Федеральный Ядерный Центр (ВНИИЭФ), Саров, Россия

² СарФТИ НИЯУ «МИФИ», Саров, Россия

При скорости удара, близкой к баллистическому пределу, тупые ударники пробивают пластичные преграды в режиме выбивания «пробки» [1]. К образованию «пробки» приводит локализация сдвига с последующим образованием магистральной трещины. Соответственно, нормальный удар цилиндрического (стержневого) ударника с плоской головной частью (плоским торцем) по преграде с выбиванием из неё «пробки» может рассматриваться как двумерная валидационная задача для моделей упругопластичности и сдвигового разрушения при достаточно высокой скорости деформации (10^4 - 10^5 с⁻¹).

Для численного моделирования процессов высокоскоростного деформирования и разрушения металлов Джонсон и Кук разработали модели пластичности [2] и сдвигового разрушения [3], в которых учитываются деформационное и скоростное упрочнение и термическое разупрочнение. Модели Джонсона-Кука широко используются при численном моделировании высокоскоростного пробивания и проникания и, гораздо реже, взрывного разрушения.

В оригинальной формулировке модели пластичности Джонсона-Кука [2] предполагается, что модуль сдвига постоянен $G=G_0=const.$, а предел текучести зависит от пластической деформации, скорости пластической деформации и температуры, причём эти эффекты упрочнения и разупрочнения действуют независимо друг от друга:

$$Y = \left[A + b \cdot \varepsilon_p^k \right] \cdot \left[1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \cdot \left[1 - \bar{T}^m \right] \text{ при } \bar{T} < 1 \text{ и } Y=0 \text{ при } \bar{T} \geq 1, \quad (1)$$

где ε_p – интенсивность пластической деформации, $\dot{\varepsilon}_p$ – интенсивность скорости пластической деформации, $\dot{\varepsilon}_0$ – нормировка скорости пластической деформации (обычно $\dot{\varepsilon}_0 = 1$ с⁻¹),

$\bar{T} = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ – приведённая (гомологическая) температура, T_m – температура плавления,