

Modelowanie powstawania naprężeń w warstwie wierzchniej

Modeling of stressing in a surface layer

KRZYSZTOF TUBIELEWICZ
IRENEUSZ PIOTR CHMIELIK
HUBERT MICHALCZUK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.60>

Przedstawiono przebieg symulacji komputerowej stanu naprężeń występujących w strefie kontaktu przy oddziaływaniu odkształceń mechaniczno-ciepłnych wywołanych procesem nagniatania. Wyniki opracowano w programie I-DEAS Master Series firmy SDRC z Milford.

SŁOWA KLUCZOWE: technologia nagniatania, naprężenia, metoda elementów skończonych MES

The computer simulation of the state of stress occurring in the contact zone during the influence of mechanical and caulking deformations caused by the process of burnishing was presented. The simulation results were based on the I-DEAS Master Series from SDRC from Milford.

KEYWORDS: burnishing technology, stress, finite element method FEM

W procesach formowania warstwy wierzchniej elementów maszynowych występują złożone zjawiska fizyko-chemiczne powodujące powstawanie naprężeń własnych. Ich przyczyną są tzw. odkształcenia zewnętrzne – wywołane głównie siłami zewnętrznymi i zjawiskami cieplnymi – naruszające istniejący stan równowagi energetycznej struktury materiału, co prowadzi do powstawania sił wewnętrznych, objawiających się jako naprężenia i odkształcenia. Opis tych procesów jest wyjątkowo złożony, jednak na użytek technologii można określić jakościowe modele powstawania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. I tak, wykorzystując podstawowe pojęcia odkształcenia postaciowego i objętościowego, wyróżnia się:

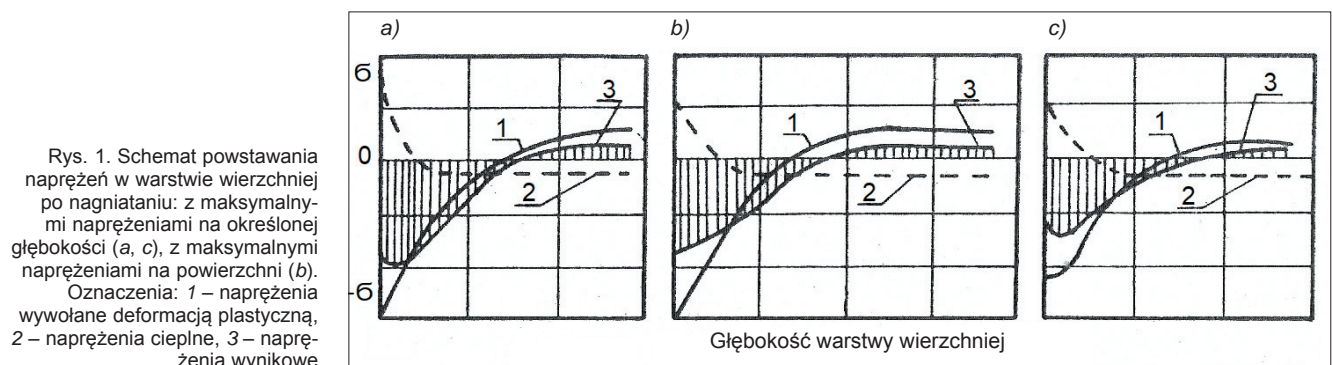
- model odkształceń postaciowych – plastycznych,
- model odkształceń objętościowych – strukturalnych.

Ponadto w modelu odkształceń postaciowych – plastycznych można wyodrębnić modele mechaniczny (zimny) i cieplny [1]. Gdyby oddziaływanie zewnętrzne utożsamiać z siłami mechanicznymi, którymi są zwykle siły występujące w procesie kształtowania wyrobu, to po teoretycznym wyeliminowaniu ciepła otrzymuje się schemat „siła – odkształcenia – naprężenia własne”, czyli model mechanicz-

nych odkształceń postaciowych – plastycznych. Ten model jest właściwy w przypadku technologii, w których można ograniczyć wpływy cieplne, np. w procesach obróbki plastycznej na zimno i większości technologii nagniatania [2]. Jeżeli natomiast w oddziaływaniach zewnętrznych zakłada się wyłączny wpływ ciepła związany z występowaniem podwyższonej temperatury, czego rezultatem są odkształcenia, powodujące powstawanie naprężeń własnych, wtedy obowiązuje model cieplny odkształceń postaciowych – plastycznych. Jest on odpowiedni w przypadku kształtowania wyrobów stalowych w temperaturze poniżej A1. Model cieplnych odkształceń postaciowych – plastycznych może być wykorzystywany np. w analizie procesów: obróbki plastycznej na gorąco, obróbki elektroerozyjnej i (częściowo) obróbki nagniataniem elektromechanicznym [3]. Jednak w praktyce niemal zawsze występują pośrednie modele mieszane, w których jednoczesne oddziaływanie sił i ciepła powoduje powstawanie i różną orientację naprężeń własnych w warstwie wierzchniej.

Podczas analizy powstawania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej w trakcie niektórych procesów nagniatania – dynamicznego czy elektromechanicznego – nie można pominąć wpływu ciepła, powodującego szybkie i nierównomierne nagrzewanie się obszaru deformacji. Niestacjonarny rozkład temperatury w strefie deformacji wywołuje nierównomierne zmiany objętości mikroobszarów materiału i w konsekwencji – pojawienie się naprężeń cieplnych. Leżące poza strefą deformacji warstwy materiału przeciwdziałają rozszerzeniu się nagrzanych warstw, wskutek czego powstają termiczne naprężenia ściskające lub rozciągające.

Naprężenia termiczne sumują się z naprężeniami wynikającymi z odkształceń plastycznych i następuje przeorientowanie znaku naprężeń w warstwie wierzchniej. W zależności od wielkości gradientu naprężeń termicznych i naprężeń wynikających z deformacji plastycznej maksymalne wartości naprężeń własnych mogą pozostać na powierzchni lub „zejść” do wnętrza warstwy wierzchniej (rys. 1).



Rys. 1. Schemat powstawania naprężeń w warstwie wierzchniej po nagniataniu: z maksymalnymi naprężeniami na określonej głębokości (a, c), z maksymalnymi naprężeniami na powierzchni (b). Oznaczenia: 1 – naprężenia wywołane deformacją plastyczną, 2 – naprężenia cieplne, 3 – naprężenia wynikowe

* Prof. dr hab. inż. Krzysztof Tubielewicz (krzysztoftubielewicz@op.pl) – emerytowany prof. zw. Politechniki Częstochowskiej; dr inż. Ireneusz Piotr Chmielik (p.chmielik@taylor-hobson.pl) – Taylor Hobson Polska; mgr inż. Hubert Michalczuk (hubertmichalczuk@poczta.onet.pl) – Politechnika Częstochowska, Instytut Technologii Mechanicznych; P.P.U. MAG-RYŚ Rędziny – Nowoczesna Narzędziownia

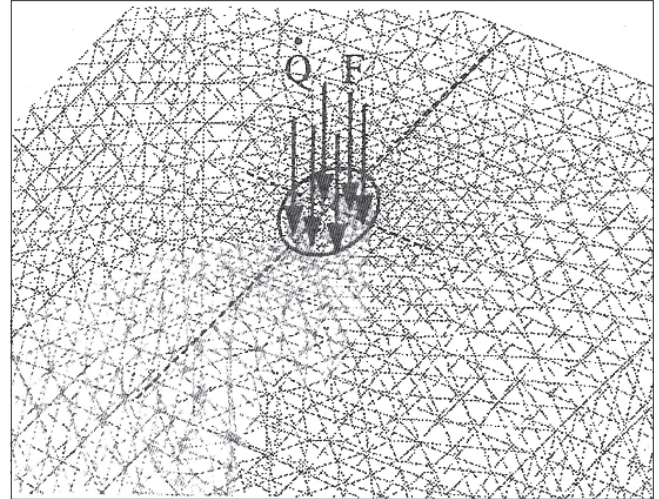
Przy naprężeniach maksymalnych wewnątrz warstwy wierzchniej oddziaływanie termiczne w każdym przypadku będzie zmniejszać wielkość naprężeń ostatecznych, lecz ich maksimum prawie zawsze pozostaje w pewnej odległości od powierzchni przedmiotu. W niektórych procesach obróbki nagniataniem (w nagniataniu elektromechanicznym) mechanizm formowania naprężeń własnych należy zatem rozpatrywać z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania deformacji plastycznych i procesów cieplnych zachodzących w warstwie wierzchniej.

Symulacje komputerowe stanu naprężeń

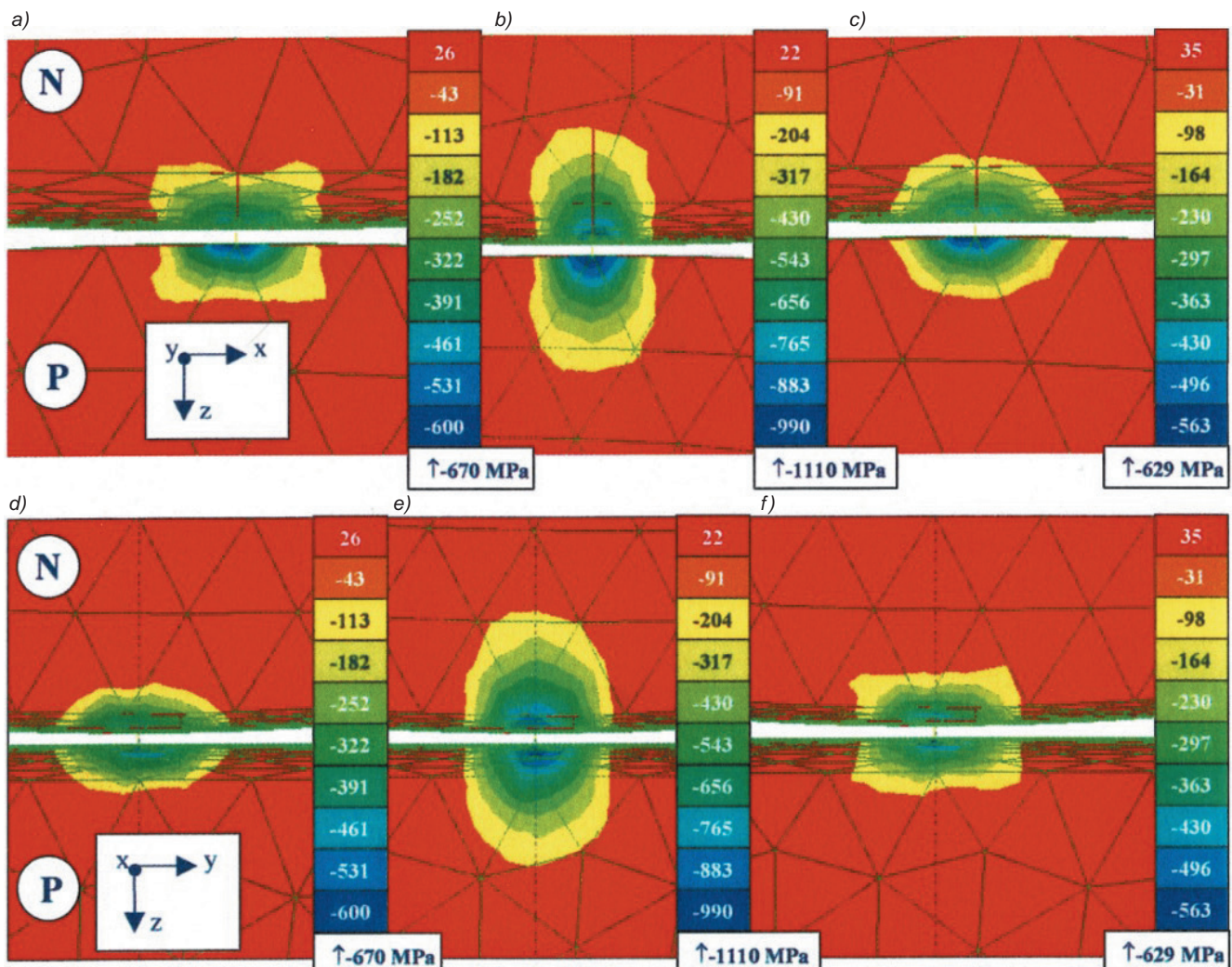
W celu przeanalizowania rozkładu naprężeń dla przypadku nagniatania elektromechanicznego przeprowadzono komputerową (numeryczną) symulację stanu naprężeń, gdy w strefie kontaktu występuje temperatura odpowiadająca temperaturze przemian strukturalnych dla stanu stabilnego rozchodzenia się ciepła, a pole kontaktu odpowiada warunkom plastyczności, dla danych parametrów (I, U, F_v, T).

Symulację wykonano w programie I-DEAS Master Series 7 i 8 firmy SDRC z Milford, Ohio. Na powierzchni przedmiotu w postaci walca wydzielono obszar o wymiarach 5×5 mm i głębokości 4 mm oraz promieniu $R = 20$ mm (rys. 2) – kształt strefy kontaktu narzędzia (N) z przedmiotem (P) modelowano jako elipsę, do której

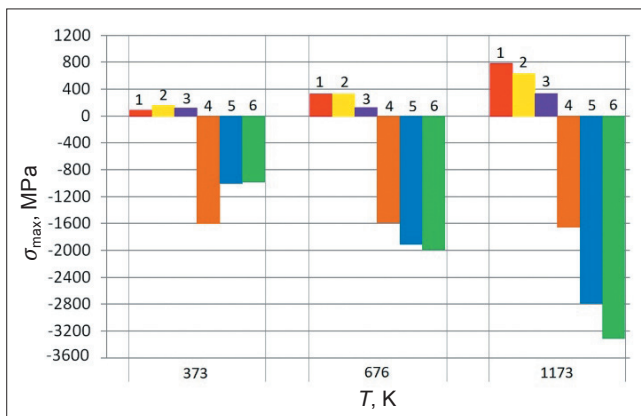
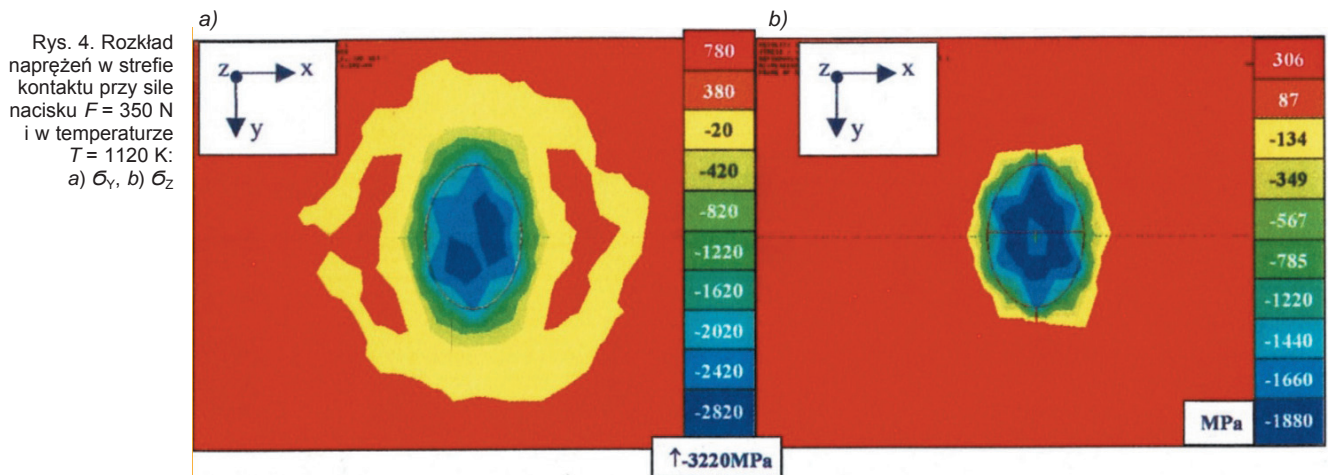
przykładano siłę docisku $F = 150 \div 350$ N w temperaturze $293 \div 1110$ K. W badaniach zastosowano tetraedryczne elementy skończone opisane w kartezjańskim układzie współrzędnych x, y, z . Na ten obszar nałożono siatkę powierzchniową $0,1$ mm. Następnie użyto siatki bryłowej $0,3$ mm, czego wynikiem było automatyczne zagęszczenie podziału (rys. 2). Wybrane wyniki symulacji pokazano na rys. 3–5.



Rys. 2. Model siłowo-temperaturowy z siatką elementów skończonych



Rys. 3. Rozkład naprężeń $\sigma_x, \sigma_z, \sigma_y$ (przy siłę $F = 150$ N i w temperaturze $T = 293$ K) w strefie kontaktu: a–c) naprężenia w płaszczyźnie xOz; d–f) naprężenia w płaszczyźnie yOz



Rys. 5. Wartości naprężeń uzyskane z symulacji komputerowej (MES) dla różnej temperatury strefy kontaktu przy sile $F = 350$ N (1, 6 – σ_y ; 2, 5 – σ_x ; 3, 4 – σ_z)

Wyniki symulacji świadczą o znacznym wzroście naprężeń ściskających w strefie pod powierzchnią obszaru kontaktu (rys. 5): w kierunku zgodnym z posuwem narzędzia uzyskano $\sigma_z \approx -1800$ MPa, a w kierunku zgodnym z działaniem siły naporu, tj. prostopadłym do powierzchni nagniatanej – $\sigma_z \approx -1600$ MPa.

Uwagi końcowe

Wyniki symulacji numerycznych (rys. 3–5) pozwoliły na szczegółową analizę rozkładu naprężeń w układzie przestrzennym. W obszarach znajdujących się w strefie odkształceń (rys. 4b) naprężenia rozciągające osiągnęły wartości: $\sigma_y \approx 780$ MPa – w kierunku zgodnym z kierunkiem posuwu narzędzia, $\sigma_z \approx 300$ MPa – w kierunku zgodnym z kierunkiem posuwu. Ponadto można zauważyć, że stan naprężeń wywołanych zjawiskami cieplno-mechanicznymi zachodzącymi w czasie nagniatania zależy w tej metodzie głównie od temperatury (rys. 5) w strefie kontaktu.

Jak wiadomo, właściwości warstwy wierzchniej wytworzonych elementów w dużym stopniu zależą od stanu naprężeń własnych [2, 4, 5]. Model ich powstawania w tej metodzie obróbki jest złożony i zdeterminowany przez wiele czynników, w tym głównie przez wielkość zgniotu i temperaturę wywołującą przemiany fazowe.

Znaczny przyrost temperatury w głąb materiału powoduje nagły wzrost naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej, który jest potęgowany przez napór narzędzia nagniatającego, do wartości równej granicy plastyczności w danej temperaturze. Podgrzany (do temperatury powyżej A_{C3} – stale podoeutektoidalne) materiał warstwy

wierzchniej w momencie stygnięcia początkowo zaczyna się kurczyć (do osiągnięcia temperatury przemiany austenit–martenzyt), a następnie zwiększa swoją objętość ok. 1÷3% (przemiana $\gamma \rightarrow \alpha$), a więc bardziej niż pod wpływem gradientu temperatury. Przemiana martenzytyczna najintensywniej zachodzi w warstwie podpowierzchniowej, która zwiększa swą objętość. Strefy położone głębiej stygną wolniej, a przemiany strukturalne zachodzą z pewnym opóźnieniem, rozciągając materiał położony poniżej warstwy podpowierzchniowej, co powoduje dodatkowe ściskanie materiału położonego bezpośrednio pod powierzchnią kontaktu. Powstałe naprężenia rozciągające i ściskające sumują się, wywołując określony stan naprężeń wynikowych, który zależy od rodzaju materiału i parametrów nagniatania elektromechanicznego.

Wyniki symulacji wskazują na możliwość uzyskania w warstwie wierzchniej nagniatanej elektromechanicznie zarówno naprężeń ściskających, jak i rozciągających, na różnej głębokości oraz o różnym rozkładzie i różnym umiejscowieniu maksimum [6].

LITERATURA

1. Tubielewicz K. „Analiza naprężeń powstałych w warstwie wierzchniej podczas procesu nagniatania”. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 1993.
2. Tubielewicz K. „Analiza zjawisk towarzyszących odkształceniu warstwy wierzchniej w procesie nagniatania”. Seria Monografie 13. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 1990.
3. Musiałik J. „Zjawiska termomechaniczne determinujące właściwości warstwy wierzchniej stali nagniatanej elektromechanicznie”. Seria Monografie 93. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2003.
4. Tubielewicz K., Musiałik J. „Der Zustand der Stahldeckschicht nach dem elektromechanischen Glattwalzen”. *Tribologie und Schmirungstechnik*. 47, 3 (2000): s. 47–49.
5. Musiałik J., Tubielewicz K. „Warstwa wierzchnia stali po nagniataniu elektromechanicznym”. *IV Międzynarodowa Konferencja „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej – WW 99”*, Lubniewice–Gorzów Wielkopolski 1999, s. 211–219.
6. Tubielewicz K., Musiałik J. „Мікроструктурні зміни у сталях під час поверхневої пластичної деформації електромеханічним методом”. *Physicochemical Mechanics of Materials*. 35, 5 (1999): s. 102–104. ■