



Doctoral Thesis

L'Arc électrique court à plasma réduit et la technique de l'étincelage électro-érosion et traitements superficiels:

Author(s):

Fischer, Georges

Publication Date:

1959

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000270956> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Prom. Nr. 2922

**L'arc électrique court à plasma réduit
et la technique de l'étincelage:
électro-érosion et traitements superficiels**

Thèse

présentée à l'Ecole Polytechnique Fédérale, Zurich
pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences Techniques

par

GEORGES FISCHER

ing. dipl. de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures de Paris
citoyen français

Rapporteur: Professeur Ed. Gerecke
Corapporteur: P.-D. Dr. W. Rieder

Juris-Verlag, Zürich

1959

1. BUT DE L'ETUDE ET APERÇU DES RESULTATS OBTENUS

La technique de l'étincelage groupe tous les procédés d'usinage et de traitement superficiel de corps conducteurs et semi-conducteurs utilisant une succession de décharges électriques intermittentes. Les plus connus sont: l'usinage par électro-érosion, le durcissement superficiel par électrode vibrante, la "désintégration" de forêts et tarauds cassés à l'intérieur d'une pièce usinée.

Pour perfectionner cette technique et étendre son domaine d'application, et surtout pour mettre au point un nouveau procédé: celui du dépôt de carbures par électrode vibrante, nous avons déterminé expérimentalement et théoriquement les caractéristiques des différents phénomènes électriques, physiques et physico-chimiques susceptibles d'intervenir dans la technique de l'étincelage.

Intéressée par les résultats de ces procédés, l'industrie envisage leur utilisation généralisée. Voici quelque temps déjà, le directeur du bureau d'études machine d'une grande entreprise française a formulé le problème du durcissement superficiel en ces termes:

"Par voie électrique on se propose d'obtenir à la surface de pièces mécaniques en acier (acier au carbone, acier allié...) et après leur usinage définitif, une couche très mince de carbures métalliques ou de martensite très dure, dans le but d'augmenter la résistance à l'usure des surfaces ainsi traitées.

La couche durcie doit être homogène et parfaitement adhérente.

La couche durcie, pour résister à des chocs éventuels, ne doit pas excéder 0,5 mm en profondeur.

La structure du métal de base (généralement acier non trempé) ne doit pas être modifiée.

L'échauffement de la pièce doit être limité pour éviter les déformations et la formation de contraintes internes préjudiciables quant à la résistance mécanique de la pièce.

Le traitement ne doit pas modifier beaucoup les dimensions de la pièce.

La résistance à l'usure de la couche durcie doit être grande, même lorsqu'elle frotte sur une autre surface traitée électriquement, sur une surface en carbure, sur une surface en acier...

Destiné à l'amélioration des outils de coupe et de l'outillage en général, ce procédé doit réussir là où le rechargement dur par soudage à l'arc laisse à désirer."

L'usinage par électro-érosion est un procédé d'usinage de pièces en acier trempé et en carbure fritté. Pour ces matériaux très durs, tous les modes d'usinages classiques sont impossibles à l'exception de l'usinage par meules diamantées.

A l'aide d'un servo-mécanisme, l'électrode outil E_1 , généralement en cuivre, est maintenue à une distance de l'ordre du μm de l'électrode E_2 constituée par la pièce à usiner. Ces électrodes sont immergées dans un liquide diélectrique et sous l'action d'une suite de décharges successives produites par un générateur d'impulsions de courant, l'électrode outil pénètre dans la pièce à usiner. Voir figure 1.1.

L'usure de la pièce à usiner est prépondérante et cela indépendamment de la dureté de cette pièce, mais pour les machines classiques l'usure de l'électrode outil n'est pas négligeable.

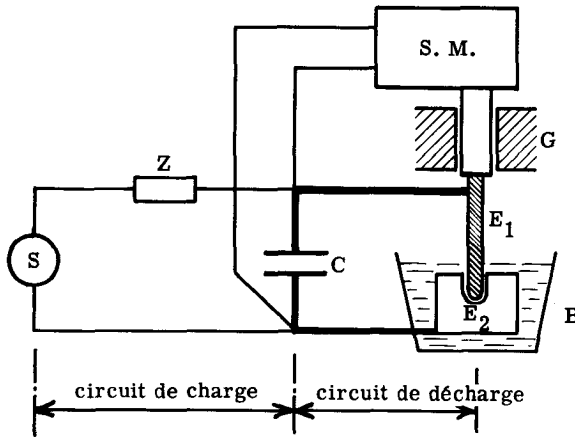


Fig. 1.1 Schéma de principe d'une machine à usiner par électro-érosion

- S source de courant continu
- Z impédance de charge
- C condensateur
- E_1 électrode mobile
- E_2 électrode fixe (pièce à usiner)
- S.M. servo-moteur de l'électrode mobile
- G glissière
- B bac contenant le liquide diélectrique

Contrairement à l'idée généralement admise par les techniciens de l'étincelage, la décharge électrique utilisée en électro-érosion, dont la durée se mesure en microsecondes, est un arc électrique stable, du type arc court à plasma réduit et quel que soit le diélectrique qui baigne les électrodes, cet arc jaillit dans une atmosphère de

vapeurs métalliques. Pour cette décharge, des mesures précises ont montré que les caractères des phénomènes transitoires apparaissent pour l'amorçage de l'arc par émission froide et quelquefois pour la disparition de cet arc par effet tunnel, mais la durée de ces phénomènes transitoires est inférieure à $30 \cdot 10^{-9}$ secondes; ils n'intéressent donc qu'une très faible partie de la décharge. Ainsi, toutes choses égales ailleurs, la décharge utilisée en électro-érosion se répète identiquement à elle-même, elle est reproductible et non pas unique et sa durée de vie dépend surtout de l'impulsion de courant fourni par le générateur.

Cet arc court à plasma réduit se différencie de l'arc classique tel qu'il est utilisé par exemple pour le soudage à l'arc, par la très faible distance entre les électrodes, $0,1 \dots 1 \mu\text{m}$, par la très forte densité de courant, de l'ordre de 10^6 A/cm^2 , par l'égalité d'étendue de la tache cathodique et anodique et par une tension d'arc indépendante de l'intensité du courant.

L'étude énergétique de la décharge montre que l'enlèvement de matière est essentiellement dû à l'énergie des électrons arrivant sur l'anode. Ainsi, pour une décharge polarisée, produite par une impulsion de courant polarisée, l'usure relative de la cathode (électrode outil) est très faible, d'autant plus d'ailleurs que la durée de la décharge est plus courte.

Cette usure relative de l'électrode outil est encore diminuée si l'on adopte pour cette électrode un corps conducteur à température de fusion élevée, à fort coefficient de conductivité calorifique et électrique et à grande chaleur de fusion et de vaporisation. Néanmoins pour des questions de facilité d'usinage de l'électrode outil, certains techniciens préfèrent les électrodes en laiton aux électrodes en cuivre, tungstène ou cuivre-tungstène fritté.

Le générateur d'impulsions de courant polarisées de très forte intensité ($i = 100 \dots 2000 \text{ A}$) a pu être réalisé par un circuit oscillant associé à un redresseur sec au germanium ou même au silicium, et pour les impulsions de courte durée utilisées en électro-érosion, l'efficacité des redresseurs a été contrôlée à l'aide d'un shunt non inductif. Outre la propriété de produire des impulsions de courant polarisées sans perte notable d'énergie, les redresseurs contribuent à l'extinction de l'arc court et empêchent l'évolution de la décharge en arc continu.

Corrélativement, pour éviter le court-circuit permanent par contact métallique des électrodes, l'étude de l'amorçage de l'arc court par émission froide d'électrons a montré, en plus de l'importance de la stabilité du servo-mécanisme de l'électrode mobile, l'effet favorable d'une faible valeur de l'inductance du circuit de décharge.

Le procédé de durcissement superficiel par électrode vibrante utilise un ensemble plus simple que la machine à usiner par électro-érosion, le servo-mécanisme du porte-outil étant remplacé par un vibreur électromagnétique, pneumatique ou mécanique: voir figure 6.8.

L'électrode mobile généralement cathode vient périodiquement en contact avec la pièce à traiter. Cette électrode est nécessairement constituée par un corps conducteur à haute température de fusion généralement tungstène, quelquefois graphite, molybdène ou carbure métallique.

La décharge produite est encore un arc court, d'abord "sans" plasma, puis "avec" plasma par suite de l'augmentation de la distance entre les électrodes. Mais pour une valeur du quotient, de la tension maximum aux électrodes par la valeur de l'inductance du circuit de décharge, inférieure à $2 \text{ V} / \mu \text{ H}$ ($U_{e \text{ max}} \lesssim 40 \text{ V}$, $L \gtrsim 20 \mu \text{ H}$) l'amorçage de la décharge par arc se fait généralement après le contact métallique des électrodes: c'est l'arc de rupture.

Le durcissement produit est une trempe superficielle due à l'échauffement rapide de la zone intéressée par l'arc de courte durée, suivi du refroidissement rapide par conduction de la chaleur à l'intérieur de la pièce après interruption de l'arc.

Pour avoir une profondeur de trempe importante, de l'ordre de 0,5 mm, il faut un signal thermique long, c'est à dire un arc de rupture de grande durée, voisine de 1 ms.

Par suite de l'éloignement de l'électrode mobile, l'arc court à plasma réduit évolue en arc avec plasma; la densité de courant dans la tache anodique diminue, l'évaporation du métal de l'anode aussi et le cratère résultant est étendu mais peu profond.

La diffusion des atomes de l'électrode mobile dans la pièce traitée n'est décelable pour le carbone seulement, et même dans ce cas, la profondeur de la zone influencée par la diffusion est inférieure à 10 $\mu \text{ m}$.

L'intérêt du durcissement superficiel réside dans le fait que la pièce traitée reste froide dans son ensemble: déformations, contraintes internes et tappures de trempe n'apparaissent pas, de plus, le traitement peut se limiter à une partie seulement de la surface.

Les "désintégrateurs" utilisés pour éliminer des parties dures sur une pièce usinée sans l'endommager utilisent également l'arc de rupture. L'action répétée de cet arc sur la même surface métallique en milieu liquide (eau additionnée d'huile soluble) produit l'éloignement par destruction de la partie martelée par l'électrode mobile, à la fois par électro-érosion, oxydation et effrittement. Pour ces appareils, la tension de la source ($U_s \approx 12 \text{ V}$) peut être inférieure à la tension de l'arc court ($U_a \approx 15 \text{ V}$).

Le procédé du dépôt de carbure par électrode vibrante ne conduit pas à une transformation allotropique ou chimique de la surface mais à un dépôt de carbure, provenant de l'électrode mobile, généralement en carbure fritté, sur la pièce à traiter, celle-ci pouvant être en acier doux.

Ce transport de matière se fait essentiellement de l'anode à la cathode. Il n'est pas assuré par l'arc électrique mais se produit au moment de la rupture de la soudure liquide des électrodes qui accompagne l'ouverture du contact.

A chaque rupture du courant le dépôt est fonction de l'intensité de ce courant, et pour éviter que l'arc de rupture, qui suit l'ouverture du contact métallique, produise la décomposition et l'évaporation du carbure précédemment déposé, il faut que la durée de cet arc soit très courte, inférieure à 10 μ s, d'où un circuit de décharge à inductance nécessairement très faible. Voir figure 6.10.

Ainsi, si le procédé de durcissement par trempe superficielle utilise une succession d'arcs de rupture, le procédé de durcissement par dépôt de carbure nécessite l'absence même de cet arc. En effet, les corps composés sont décomposés par l'arc et le transport de matière dans l'arc d'une électrode en carbure sur une pièce métallique conduit nécessairement à un dépôt hétérogène.

Conformément aux publications d'un Professeur d'une Ecole allemande [1], le procédé de dépôt de carbure par rupture dissymétrique de la zone de soudure des électrodes, décrit et expérimenté dans cette étude, n'avait encore jamais été réalisé ou envisagé. Nous avons réalisé ce dépôt avec des électrodes en carbure de tungstène, de titane et de tantale et pour les différentes électrodes essayées les conclusions déduites de l'étude théorique ont été vérifiées.